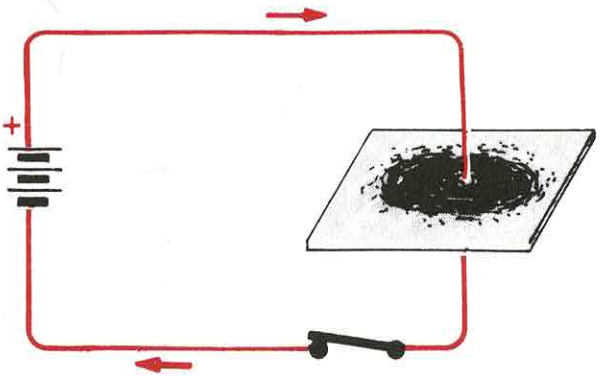
פרק יג - השדה האלקטרומגנטי, האלקטרומגנט

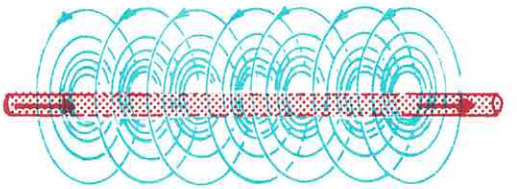
השדה האלקטרומגנטי של מוליך ישר נושא זרם

מעבירים דרך גיליון קרטון, מוליך חשמלי עבה, המחובר למקור מתח. מפזרים על פני הגיליון נסורת ברזל וסוגרים את המפסק לזמן קצר. נסורת הברזל משנה מקומה ומסתדרת סביב המוליך במעגלים, שמרכזם בציר התייל (ציור י"ג1).

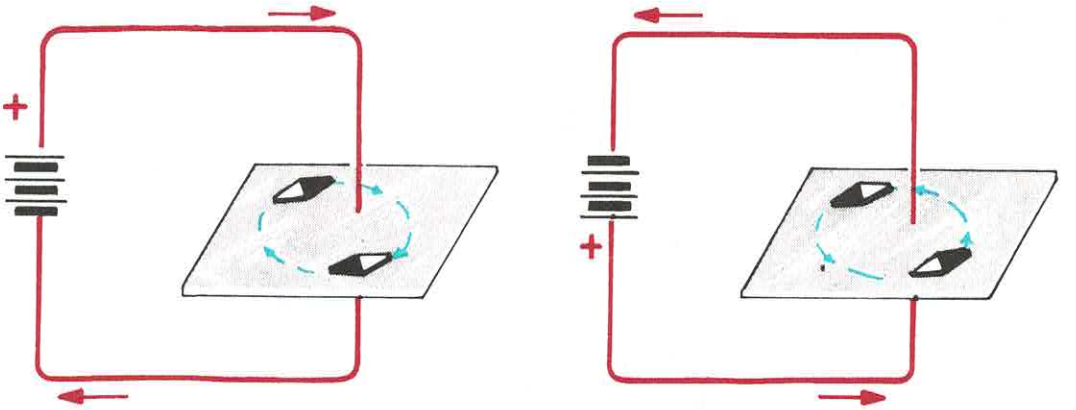


ציור י"ג1

המסקנה הנובעת מכך היא, כי סביב מוליך ישר, נושא זרם חשמלי, נוצר שדה מגנטי, אשר קווי הכוח שלו מתפשטים במעגלים, שמרכזם בציר התייל. צפיפות קווי הכוח גדולה בקירבת התייל והולכת ונעשית קטנה, ככל שגדל המרחק מהתייל (ציור י"ג2).



אם נניח על פני הגיליון, שבציור י"ג1, מחט מגנטית ניווכח, כי היא פונה בכיוון קווי הכוח, ואם נהפוך את כיוון זרימת הזרם בתייל תשנה המחט המגנטית כיוונה ותיערך במגמה הפוכה (ציור י"ג3).

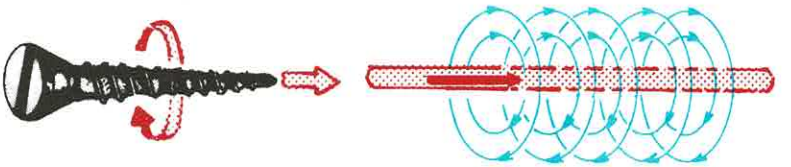


ציור י"ג3

המסקנה הנובעת מכך היא, כי מגמת קווי הכוח המגנטיים, הנוצרים כתוצאה מזרימת זרם במוליך, תלויה בכיוון זרימת הזרם.

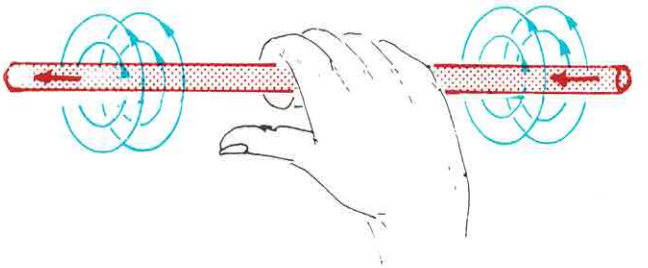
קביעת מגמת קווי הכוח בשדה האלקטרומגנטי של מוליך ישר נושא זרם

א) כלל הבורג: נתאר לעצמנו בורג דמיוני, המתברג אל תוך המוליך, בכיוון הזרם החשמלי. מגמת קווי הכוח המגנטיים תהיה בכיוון סיבוב הבורג (ציור י"ג4).



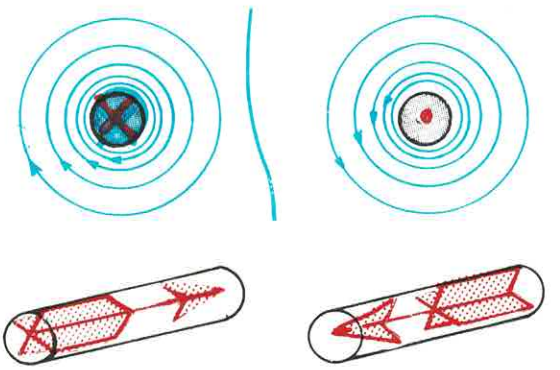
ציור י"ג4

ב) כלל היד הימינית: אם לופתים את התייל, ביד ימין, באופן שהאגודל יצביע על מגמת זרימת הזרם, יורו האצבעות את מגמת קווי הכוח סביב התייל (ציור י"ג5).



ציור י"ג5

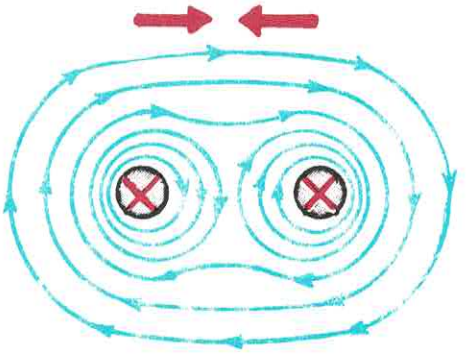
אם נתייחס עתה לחתך דמיוני כלשהו, של תייל, ונסמן זרם היוצא מתוך החתך בנקודה (ראש החץ), וזרם הנכנס לחתך בצלב (עקב החץ), נוכל לתאר את צורת השדה המגנטי וכן את מגמתו (ציור י"ג6).



ציור י"ג6

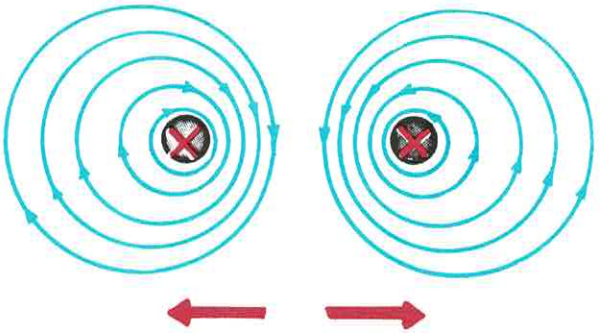
ההשפעה ההדדית בין השדות האלקטרומגנטיים של שני מוליכים מקבילים נושאי זרם

אם שני המוליכים נושאים זרם, הזורם באותה מגמה, הם נמשכים זה לזה (ציור י"ג7). קווי הכוח בין שני המוליכים הם במגמות מנוגדות, ומסיבה זו הם נמשכים ומתבטלים; לעומת זאת קווי הכוח סביב המוליכים מצויים באותה מגמה ומאפשרים היווצרות מעטפת משותפת לשני המוליכים:



ציור י"ג7

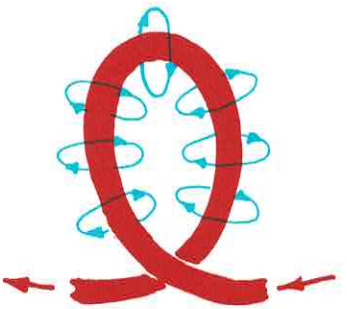
אם הזרם זורם בתילים במגמות מנוגדות, קווי הכוח בין שני המוליכים הם במגמות זהות, ומסיבה זו הם דוחים זה את זה. גם מחוץ למוליכים קווי הכוח מצויים במגמות מנוגדות, לכן לא תיתכן מעטפת משותפת, ושני התילים ידחו זה את זה (ציור י"ג8).



ציור י"ג8

השדה האלקטרומגנטי של סליל נושא זרם

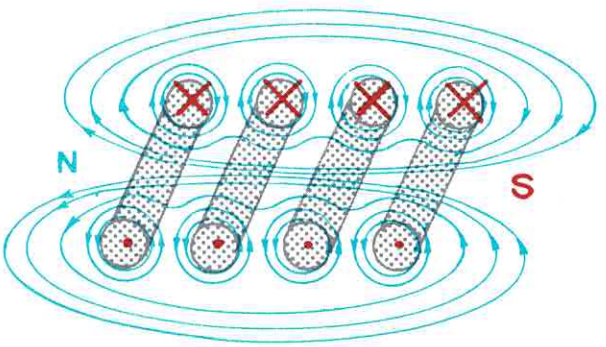
אם נקח מוליך נושא זרם ונכרוך אותו בצורת לולאה יחדרו כל קווי הכוח, המקיפים את המוליך, אל תוך הלולאה מצידה האחד ויעזבו אותה מצידה השני. נובע מזה, כי לולאה נושאת זרם מתנהגת כמגנט, ואז הצד, אשר ממנו יוצאים קווי הכוח, מהווה את הקוטב הצפוני שלה, והצד, אליו חודרים קווי הכוח, מהווה את הקוטב הדרומי (ציור י"ג9).



ציור י"ג9

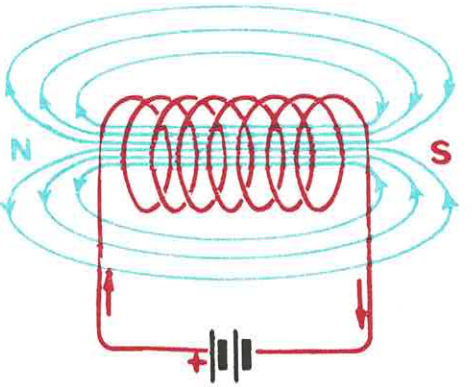
השדה המגנטי, הנוצר על-ידי לולאה, הוא שדה מגנטי חלש מאד. אם נרצה ליצור שדה מגנטי חזק יותר, עלינו לכרוך מספר רב של לולאות וליצור סליל.

בכל כריכותיו של סליל, נושא זרם, זורם הזרם באותה מגמה, ומתקבל שדה מגנטי שקול, זהה לזה של מגנט בצורת מוט, הואיל, כפי שראינו, קווי הכוח בין שני מוליכים, בהם הזרם זורם באותה מגמה, הם במגמות מנוגדות ומבטלים זה את זה. לעומתם קווי הכוח סביב המוליכים, מצויים באותה מגמה, ויוצרים שדה שקול (ציור י"ג10).



ציור י"ג10

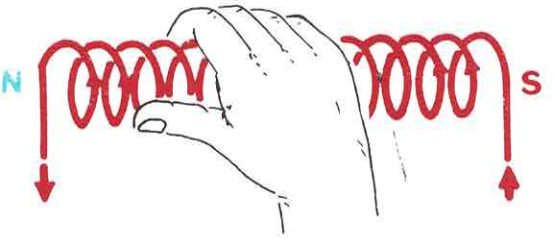
אנו רואים, אם כן, כי לסליל נושא זרם נוכל להתייחס כאל מגנט בעל צורת מוט, אך זאת בתנאי שהסליל הוא סליל ארוך וישר. בציור י"ג11 מופיעים: סליל נושא זרם והשדה המגמנטי, הנוצר על-ידו.



ציור י"ג11

קביעת הקטבים של סליל נושא זרם

כלל היד הימנית: אם לופתים את הסליל, ביד ימין, באופן שהאצבעות יציינו את מגמת הזרימה של הזרם, ציין האגודל את מקומו של הקוטב הצפוני (ציור י"ג12).



ציור י"ג12

הכוח המגנטו מניע ועוצמת השדה המגנטי

ככל שמגדילים את עוצמת הזרם הזורם דרך סליל וככל שמגדילים את מספר הכריכות, של הסליל, כן גדל חוזקו של השדה המגנטי, הנוצר על-ידי הסליל. אנו יכולים לומר, כי חוזקו של השדה המגנטי, של סליל, תלוי במספר כריכותיו ובעוצמת הזרם הזורם דרכו.

נוהגים לכנות את מכפלת עוצמת הזרם, במספר הכריכות, בשם כ ו ח - מ ג נ ט ו - מ נ י ע ולסמנו באות (M)

כזכור, כינינו את הסיבה, היוצרת את הזרם החשמלי בשם כוח-אלקטרו-מניע, ועתה אנו מכנים את הסיבה, היוצרת את השדה האלקטרומגנטי, בשם כוח-מגנטו-מניע.

יחידת הכוח-המגנטו-מניע היא אמפר-כריכות וסימונה [AT]

$$\boxed{M = IN}$$

M : הכוח-המגנטו-מניע באמפר-כריכות [AT]

I : עוצמת הזרם באמפרים [A]

N : מספר הכריכות [T]

דוגמא: דרך סליל בעל 20 כריכות זורם זרם בעוצמה של 4 אמפר.
חשב את הכוח-המגנטו- מניע.

$$M = IN = 4 \times 20 = 80AT$$

את ע ו צ מ ת ה ש ד ה ה א ל ק ט ר ו מ ג נ ט י, בתוך הסליל, אותה נסמן באות (H), נבטא על-ידי מספר האמפר-כריכות ליחידת אורך של הסליל.

$$\boxed{H = \frac{M}{\ell} = \frac{IN}{\ell}}$$

H : עוצמת השדה המגנטי ביחידות אמפר-כריכות-למטר $\left[\frac{AT}{m}\right]$

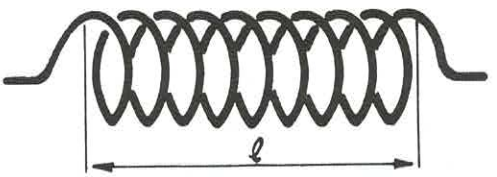
M : הכוח-המגנטו-מניע ביחידות אמפר-כריכות [AT]

ℓ : אורך הסליל במטרים [m]

I : עוצמת הזרם באמפרים [A]

N : מספר הכריכות [T]

הנוסחא האחרונה נכונה בשביל סלילים, שאורכם גדול ביחס לקוטרם, הואיל ובסלילים מסוג זה מתקבל שדה מגנטי אחיד (ציור י"ג13).



ציור י"ג13

דוגמא: מזרימים זרם בשיעור 5 אמפר דרך סליל בעל 200 כריכות.
חשב את הכוח-המגנטו-מניע של הסליל ואת עוצמת השדה האלקטרומגנטי בתוך הסליל, אם אורכו 10 ס"מ.

$$M = IN = 5 \times 200 = 1000AT$$

$$H = \frac{M}{\ell} = \frac{1000}{0.1} = 10000\ \frac{AT}{m}$$

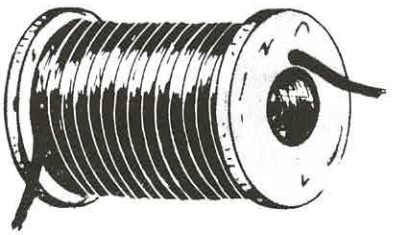
כפי שראינו, נמצאת עוצמת השדה האלקטרומגנטי (H) ביחס ישר לעוצמת הזרם הזורם בסליל, ביחס ישר למספר הכריכות (N) וביחס הפוך לאורך הסליל (ℓ).

המסקנה, הנובעת מיחסים אלה, היא: כדי לקבל שדה מגנטי חזק, עלינו להזרים דרך הסליל זרם בעל עוצמה רבה ככל האפשר.

באשר למספר הכריכות, ניתן להגדיל את מספרן על-ידי-כך שמשתמשים בתייל מצופה חומר מבדד ומצופפים את הכריכות באופן שיגעו זו בזו.

לעומת זאת עוצמת השדה האלקטרומגנטי נמצאת ביחס הפוך לאורכו של הסליל, וככל שנצמצם את אורכו יחזק השדה. ניתן כמובן להשתמש בסלילים קצרים יותר, אך ברור שבמקרה זה יהיה מספר הכריכות קטן יותר. ניתן גם להשתמש בתילים דקים יותר כדי לצמצם את אורך הסליל מבלי לצמצם את מספר הכריכות, אך בדרך זו נהיה נאלצים לצמצם את עוצמת הזרם כדי למנוע עוצמת זרם גבוהה מהמותר בתילים.

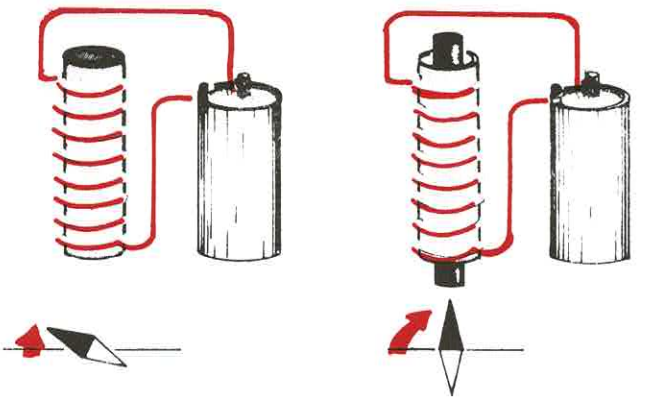
הפתרון ההגיוני ביותר לבעיה זו הוא לכרוך את התייל בשכבות, כפי שמתואר בציור י"ג14. אם כורכים את התייל בשכבות צפופות, ניתן להרבות בכריכות מבלי לצמצם את שטח החתך של התילים, וכמו כן לצמצם את אורך הסליל מבלי לצמצם את מספר הכריכות.



ציור י"ג14

האלקטרומגנט

ניקח סליל, נזרים דרכו זרם חשמלי ונקרב אליו מחט מגנטית. ניווכח, כי המחט מושפעת על-ידי השדה המגנטי. נזיז את המחט המגנטית למקום כלשהו, בו השפעת השדה חלשה מאד, ונכניס לתוך הסליל ל י ב ת ב ר ז ל, והנה נראה, כי גברה השפעת השדה המגנטי על המחט (ציור י"ג15).



ציור י"ג15

ליבת ברזל בתוך סליל גורמת ליצירת קווי כוח רבים וצפופים יותר, ומסיבה זו גברה ההשפעה על המחט המגנטית. בפרק הבא נעסוק ביתר פרוטרוט בסיבות הגורמות לכך.

אם נפסיק את זרימת הזרם, דרך הסליל, תיפסק גם ההשפעה המגנטית על המחט, כאשר הליבה עשויה ברזל רך. המסקנה הנובעת מכך היא, שליבת הברזל הפכה למגנט ארעי, בהשפעת הסליל, ופעולתו פסקה עם הפסקת זרימת הזרם החשמלי.

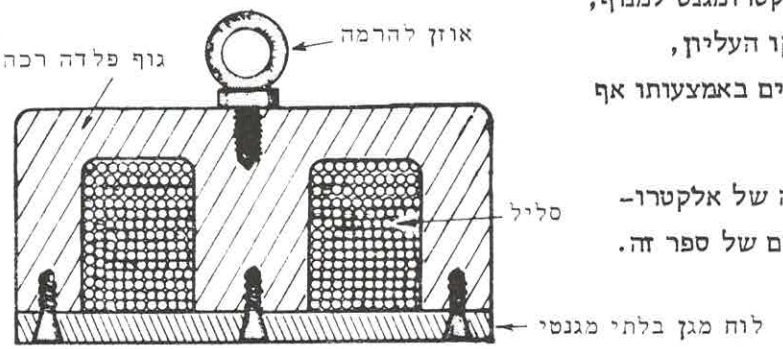
מגנטים מסוג זה קרויים מגנטים חשמליים או אלקטרומגנטים, ויש בהם שימוש נרחב בטכניקה. אנו נכיר עתה מספר שימושים באלקטרומגנטים.

אלקטרומגנטים להרמת משאות

מקובל להשתמש באלקטרומגנטים להרמת משואות ברזליים כגון גרוטאות ברזל, מוטות ברזל ועוד. האלקטרומגנט בנוי גוף עשוי פלדה רכה, ובתוכו כרוך סליל בעל מספר כריכות רב יחסית. תחתית האלקטרומגנט מוגנת בלוח העשוי חומר בלתי מגנטי כדי למנוע סגירת מעגל קווי הכח המגנטיים דרכו (ציור י"ג16).

אם מחברים את האלקטרומגנט למנוף, באמצעות האוזן, אשר בחלקו העליון, ומזרימים בו זרם, ניתן להרים באמצעותו אף משאות כבדים במיוחד.

בעניין כושר ההרמה של אלקטרו-מגנטים נעסוק בפרקים הבאים של ספר זה.



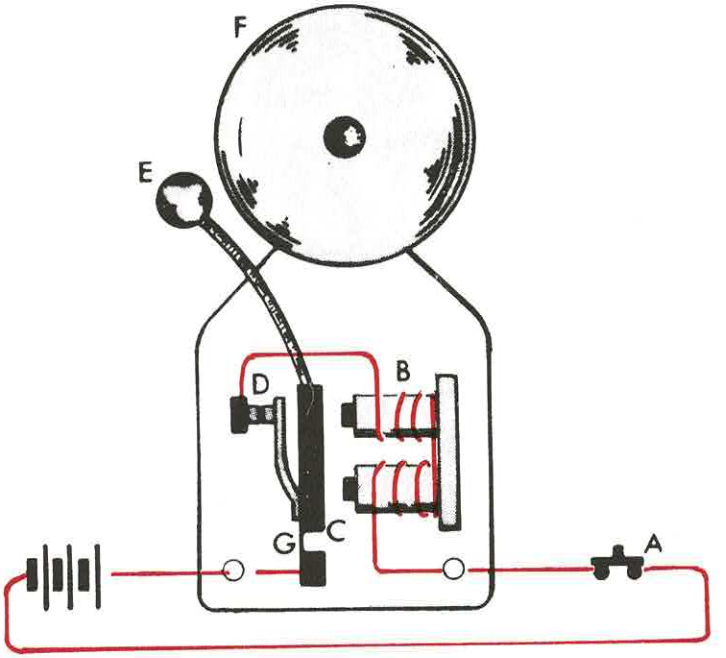
ציור י"ג16

הפעמון החשמלי

הפעמון החשמלי פועל על פי עקרון האלקטרומגנט (ציור י"ג17).

עם הפעלת הלחצן A, סוגרים את המעגל החשמלי, וזרם זורם דרך האלקטרומגנט B. העוגן C העשוי פלדה רכה נמשך אל האלקטרומגנט בחוזקה, וכתוצאה מכך נפתחים המגעים D, והעינבל E מקיש על כיפת הפעמון F. פתיחת המגעים D גורמת לפתיחת המעגל החשמלי, ועל-ידי-זה נפסקת פעולת האלקטרומגנט, והעוגן C חוזר למקומו בהשפעת הקפיץ G וסוגר חזרה את המגעים.

המחזור שתארנו חוזר על עצמו פעמים רבות, כל עוד מופעל הלחצן A, והענבל מקיש ברציפות על פני כיפת הפעמון וגורם על-ידי-כך להשמעת הצילצול.

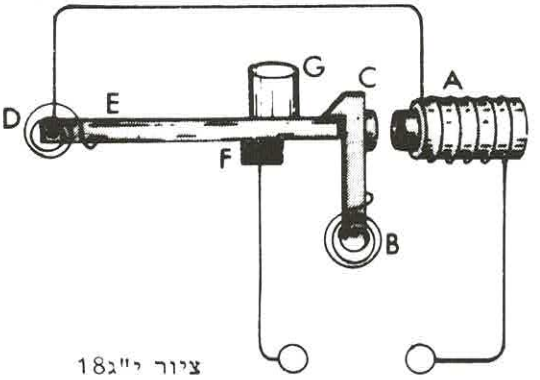


ציור י"ג17

מפסקים ליתרת זרם

הכרנו בפרק י"א את הקצר החשמלי וראינו, כי ניתן להגן על מתקן בפני קצר באמצעות נתיכים.

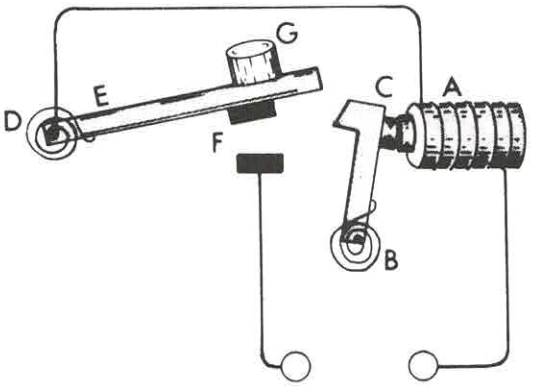
נכיר עתה אמצעי הגנה רגיש ומדוייק יותר הקרוי מפסק ליתרת זרם. מפסק זה מיועד להגנה על מתקנים בפני זרמים בעלי עוצמות גבוהות מהמותר והוא פועל על עקרון האלקטרומגנט (ציור י"ג18).



ציור י"ג18

האלקטרומגנט A מתוכנן כך שאם עוצמת הזרם במעגל עולה מעל למותר, יווצר שדה די חזק כדי להתגבר על כוח הקפיץ B, והעוגן C יימשך אל האלקטרומגנט.

על-ידי-כך, מרים הקפיץ D את המוט E, והמגעים F נפתחים (ציור י"ג19).



ציור י"ג19

פתיחת המגעים גורמת לפתיחת המעגל החשמלי, זרימת הזרם נפסקת, והעוגן C חוזר למצבו ההתחלתי. לאחר איתור התקלה ניתן לחדש את זרימת הזרם בלחיצה על הכפתור G, אשר מוריד את המוט E, הנאחז בשן העוגן C.

מכשירים רבים אחרים פועלים על עקרון האלקטרומגנט, אך בשלב זה נסתפק בשלוש הדוגמאות שהבאנו.

שאלות סיכום ובעיות לפרק יג

בחן את ידיעותיך.

לפניך אוסף שאלות ברירה, ולכל שאלה מספר תשובות, אשר רק אחת מהן נכונה. עליך לבחור את התשובה הנכונה ולסמן אותה על דף נפרד. לאחר מכן השווה את תשובותיך עם התשובות, המצויות בסוף הספר כדי לקבוע עד כמה מובן לך החומר אשר למדת.

י"ג1) סביב מוליך ישר, נושא זרם, נוצר שדה מגנטי, אשר קווי הכח שלו מתפשטים:

א) במעגלים, שמרכזם בציר התייל.

ב) בקווים ישרים, המקבילים לתייל.

ג) בקווים ישרים, המאונכים לתייל.

ד) בקווים ישרים, היוצאים מהתייל.

י"ג2) **צפיפות קווי הכוח בשדה מגנטי, הנוצר על-ידי מוליך ישר, נושא זרם, היא:**

א) קטנה בקירבת המוליך ונעשית גדולה, ככל שגדל המרחק ממנו.

ב) גדולה בקירבת המוליך ונעשית קטנה, ככל שגדל המרחק ממנו.

ג) אחידה בכל תחום השפעת השדה.

ד) תלויה בכיוון הזרימה של הזרם החשמלי בתוך המוליך.

י"ג3) **המגמה של קווי הכוח המגנטיים, הנוצרים סביב מוליך ישר, נושא זרם:**

א) תלויה בכיוון זרימת הזרם במוליך.

ב) אינה תלוייה בכיוון זרימת הזרם במוליך.

ג) תלוייה בצפיפות קווי הכוח המגנטיים ובכיוון זרימת הזרם.

ד) תלוייה בצפיפות קווי הכוח בלבד.

י"ג4) **בהתאם לכלל הבורג, בו נעזרים כדי לקבוע את מגמת קווי הכוח המגנטיים, הנוצרים סביב מוליך ישר, נושא זרם:**

א) מגמת קווי הכוח היא בכיוון התקדמות הבורג וכיוון זרימת הזרם הוא כיוון הסיבוב של הבורג.

ב) הקוטב הצפוני הוא בכיוון התקדמות הבורג ומגמת קווי הכוח היא בכיוון סיבוב הבורג.

ג) מגמת קווי הכוח היא בכיוון הסיבוב של הבורג כאשר כיוון הזרם הוא בכיוון התקדמות הבורג.

ד) כלל הבורג אינו מתאים לקביעת מגמת קווי-הכוח בשדה מגנטי, הנוצר על-ידי מוליך ישר נושא זרם.

י"ג5) **בהתאם לכלל היד הימינית, בו נעזרים כדי לקבוע את מגמת קווי הכוח המגנטיים, הנוצרים סביב מוליך ישר נושא זרם:**

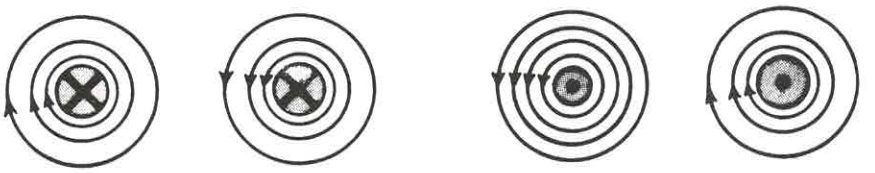
א) האצבעות מציינות את כיוון זרימת הזרם, והאגודל מציין את מגמת קווי הכוח.

ב) האגודל מציין את כיוון זרימת הזרם והאצבעות את מגמת קווי הכוח.

ג) אם הזרם זורם בכיוון כף היד, יציינו האצבעות את מגמת קווי הכוח.

ד) כלל היד הימינית אינו מתאים למטרה זו, לכן הכרחי להיעזר בכלל הבורג.

י"ג6) איזה מהתרשימים הבאים הוא הנכון ?



א) ב) ג) ד)

י"ג7) שני מוליכים ישרים נקבילים, נושאי זרם:

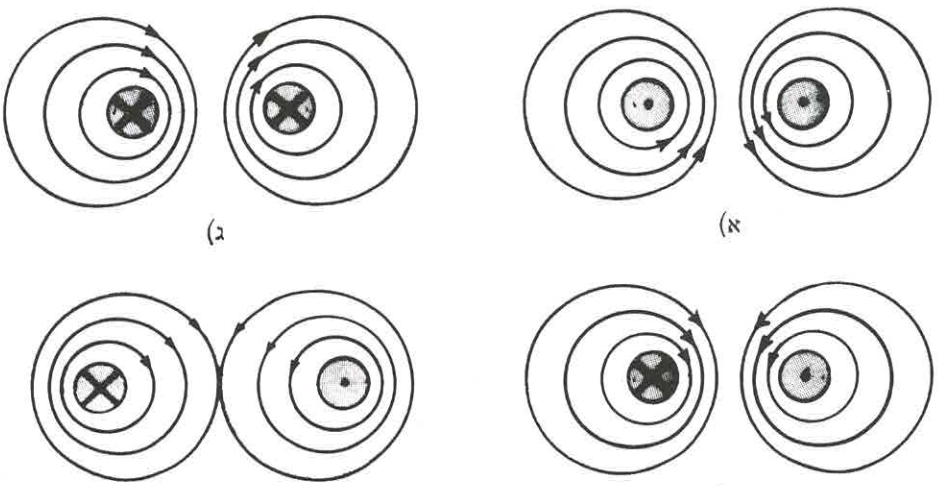
א) דוחים זה את זה, כאשר הזרמים הזורמים דרכם הם באותו כיוון.

ב) מושכים זה את זה, כאשר הזרמים הזורמים דרכם הם בכיוונים מנוגדים.

ג) דוחים זה את זה, כאשר הזרמים הזורמים דרכם הם בכיוונים מנוגדים.

ד) אינם נמשכים ואינם נדחים, הואיל ושני שדותיהם מבטלים זה את זה.

י"ג8) איזה הוא התרשים הנכון?



א) ג) ב) ד)

י"ג9) בלולאת תייל מוליך נושאת זרם:

א) כל קווי הכוח חודרים אל תוך הלולאה בצידה האחד ויוצאים מצידה השני.

ב) חלק מקווי הכוח חודרים בצידה האחד ובחלקם חודרים בצידה השני.

ג) חלק מקווי הכוח יוצאים מצידה האחד ובחלקם יוצאים מצידה השני.

ד) קווי הכוח הם במגמות הפוכות ומבטלים זה את זה.

י"ג10) **השדה המגנטי, הנוצר על-ידי סליל ישר, נושא זרם, דומה:**

א) לשדה המגנטי, הנוצר על-ידי מגנט בצורת מוט.

ב) לשדה המגנטי, הנוצר על-ידי מגנט בצורת פרסה.

ג) לשדה המגנטי, הנוצר על ידי מוליך ישר נושא זרם.

ד) אין דמיון בין שדה מגנטי של סליל ושדה מגנטי של מגנט קבוע.

י"ג11) **אם לופתים סליל, ביד ימין, באופן שהאגודל יציין את מקומו של הקוטב הצפוני יציינו האצבעות:**

א) את מקומו של הקוטב הדרומי.

ב) את מגמת קווי הכוח.

ג) את כיוון הזרימה של הזרם.

ד) את מקומו של הקוטב השלילי.

י"ג12) **נהגים לכנות את הסיבה, היוצרת את השדה האלקטרומגנטי בשם:**

א) כוח-אלקטרו-מגנטי.

ב) כוח-מגנטו-מניע.

ג) כוח-אלקטרו-מניע.

ד) אנרגיה מגנטית.

י"ג13) **הכוח-המגנטו-מניע תלוי ב-:**

א) קוטר הסליל.

ב) אורך הסליל.

ג) שטח החתך של תיל הסליל.

ד) מספר הכריכות.

י"ג14) **הכוח-המגנטו-מניע תלוי:**

א) ביחס ישר לעוצמת הזרם בסליל.

ב) ביחס הפוך לעוצמת הזרם בסליל.

ג) ביחס ישר לריבוע עוצמת הזרם בסליל.

ד) ביחס הפוך לריבוע עוצמת הזרם בסליל.

י"ג15) **עוצמת השדה האלקטרומגנטי של סליל תלויה:**

א) בעוצמת הזרם בסליל ובקוטרו.

ב) בעוצמת הזרם בסליל ובמתח המסופק לו.

ג) בעוצמת הזרם בסליל ובמספר הכריכות.

ד) במתח המסופק לסליל ובקוטרו.

י"ג16) עוצמת השדה האלקטרומגנטי של סליל נמדדת ב:-

א) וולט-כריכות למטר.
ב) אמפר-כריכות למטר.
ג) אמפר-כריכות.
ד) וולט-כריכות.

י"ג17) עוצמת השדה האלקטרומגנטי נמצאת:

א) ביחס ישר לעוצמת הזרם ולמספר הכריכות, וביחס הפוך לאורך הסליל.
ב) ביחס ישר לעוצמת הזרם ולאורך הסליל, וביחס הפוך למספר הכריכות.
ג) ביחס ישר למספר הכריכות ולאורך הסליל, וביחס הפוך לעוצמת הזרם.
ד) ביחס ישר לעוצמת הזרם, למספר הכריכות ולאורך הסליל.

י"ג18) כדי להגדיל את עוצמת השדה האלקטרומגנטי של סליל, עלינו:

א) להגדיל את עוצמת הזרם, את מספר הכריכות ואת אורך הסליל.
ב) להגדיל את עוצמת הזרם ואת מספר הכריכות, אך לקצר את הסליל.
ג) להגדיל את עוצמת הזרם ואת אורך הסליל, אך להקטין את מספר הכריכות.
ד) להגדיל את מספר הכריכות ואת אורך הסליל, אך להקטין את עוצמת הזרם.

י"ג19) השדות המגנטיים, הנוצרים על ידי מוט מגנטי ואלקטרומגנט שליבתו מוט ברזל:

א) שונים לחלוטין.
ב) שונים במידה מסוימת.
ג) דומים במידה מסוימת.
ד) זהים לחלוטין.

י"ג20) הקוטביות של אלקטרומגנט תלוייה ב-:

א) עוצמת הזרם.
ב) מתח המקור.
ג) כיוון הזרם.
ד) מספר הכריכות.

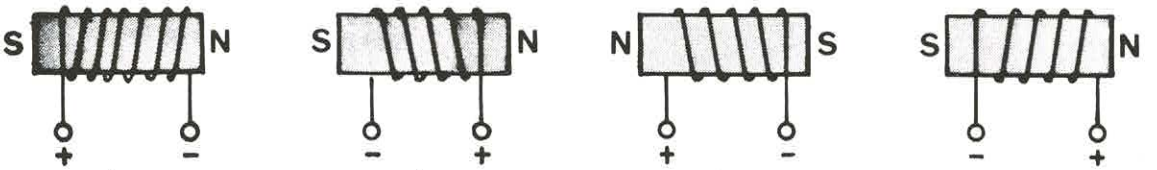
י"ג21) אם מכניסים ליבת ברזל לתוך סליל נושא זרם:

א) הפעולה המגנטית תגבר.
ב) הפעולה המגנטית תחלש.
ג) הפעולה המגנטית לא תשתנה.
ד) קוטביות השדה המגנטי תשתנה.

י"ג22) אם נכניס ליבת ברזל רך בתוך סליל נושא זרם, נקבל:

א) מגנט ארעי.
ב) מגנט קבוע.
ג) מגנט חזק.
ד) מגנט חלש.

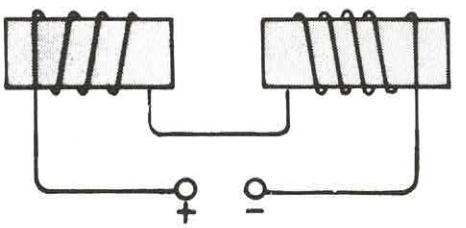
י"ג23) באיזה מהתרשימים הבאים נכונה היא קוטביות האלקטרומגנט?



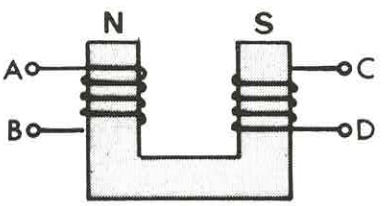
א) ב) ג) ד)

י"ג24) בהתייחס לתרשים:

א) בין האלקטרומגנטים יפעל כוח משיכה.
ב) בין האלקטרומגנטים יפעל כוח דחיה.
ג) שני השדות מתבטלים ולא יפעלו שום כוחות.
ד) הזרמים זורמים בכיוונים הפוכים ומבטלים זה את זה.



י"ג25) בתרשים מופיעה ליבה בעלת צורת פרסה. על הליבה כרוכים שני סלילים. כיצד עליך לבצע את החיבורים כדי לקבל קוטביות, המתאימה לזו המסומנת בתרשים?



א) A לקוטב החיובי, D לשלילי, B ו- C ביניהם.

ב) A לקוטב החיובי, C לשלילי, B ו- D ביניהם.

ג) A ו- C לקוטב החיובי, B ו- D לקוטב השלילי.

ד) A ו- C לקוטב השלילי, B ו- D לקוטב החיובי.

י"ג26) אלקטרומגנטים להרמת משאות משמשים להרמת:

א) גרוטאות מתכת.

ב) גרוטאות ברזל בלבד.

ג) כל משא.

ד) משאות ברזל ופלדה.

י"ג27) הפעמון החשמלי פועל על עקרון:

א) תופעת החימום.

ב) התופעה האלקטרומגנטית.

ג) הפיכת אנרגיה מכנית לאנרגיה חשמלית.

ד) הפיכת אנרגיה של חום לאנרגיה חשמלית.

י"ג28) מפסקים ליתרת זרם משמשים:

א) להגברת עוצמת הזרם במעגל חשמלי.

ב) לפתיחה וסגירה של מעגלים חשמליים.

ג) להגנה על המתקן בפני זרמים בעלי עוצמה גבוהה מהמותר.

ד) להגנה על המתקן בפני זרמים בעלי עוצמה נמוכה מהמותר.

בעיות

י"ג1) דרך סליל בעל 1000 כריכות זורם זרם בעוצמה
חשב את ערכו של הכוח-המגנטו-מניע.

י"ג2) איזו עוצמת זרם יש להזרים דרך סליל בעל 800 כריכות כדי ליצור כוח-מגנטו-מניע של 2000 אמפר-כריכות ?

י"ג3) סליל בעל 500 כריכות, שהתנגדותו 1.4 אום, מחובר למצבר בעל כא"מ של 6 וולט והתנגדות פנימית 0.1 אום. חשב את הכוח-המגנטו-מניע שיתפתח בסליל.

י"ג4) סליל בעל 600 כריכות מלופף על גליל, שאורכו 20 ס"מ. חשב את עוצמת השדה המגנטי בלב הסליל, אם עוצמת הזרם הזורם בסליל היא 0.1 אמפר.

י"ג5) זרם בעל איזו עוצמה יש להזרים דרך סליל בעל 250 כריכות, אם אורכו 10 ס"מ ועוצמת השדה המגנטי הדרושה בלב הסליל היא 500 אמפר-כריכות למטר ?

י"ג6) סליל בעל 2000 כריכות מלופף על גליל, שאורכו 50 ס"מ. זרם בעל איזו עוצמה יש להזרים דרך הסליל, כדי שבמרכז הסליל תתקבל עוצמת שדה מגנטי בשיעור 1000 אמפר-כריכות למטר ?

י"ג7) חשב את הכוח-המגנטו-מניע ואת עוצמת השדה של סליל בעל 1000 כריכות.
עוצמת הזרם בסליל היא 0.1 אמפר ואורכו 10 ס"מ.

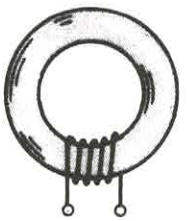
י"ג8) דרך סליל בעל 500 כריכות זורם זרם בעוצמה של 2 אמפר. סליל שני הוא בעל 400 כריכות. מה צריכה להיות עוצמת הזרם בסליל השני, כדי שלשני הסלילים יהיה אותו כוח-מגנטו-מניע ?

פרק יד - **מעגלים מגנטיים**

כפי שראינו, לקווי הכוח המגנטיים מסלולים סגורים, ומגמתם מהקוטב הצפוני אל הקוטב הדרומי. המסלול הסגור, הכולל את כלל קווי הכוח המגנטיים, קרוי מ ע ג ל מ ג נ ט י.

טבעת עשויה חומר פררומגנטי, סביבה כרוך סליל, מהווה דוגמא אופיינית של מעגל מגנטי (ציור י"ד1).

נהגים לכנות את הסליל בשם ס ל י ל מ י ג נ ו ט או ס ל י ל ע י ר ו ר ואת הזרם שהוא נושא - ז ר ם מ י ג נ ו ט או ז ר ם ע י ר ו ר.



ציור י"ד1

אם נשווה מעגל מגנטי למעגל חשמלי, נוכל לומר, כי הכוח-המגנטו-מניע יוצר את קווי הכוח המגנטיים, העוברים במעגל המגנטי, כפי שהכא"מ יוצר את הזרם החשמלי, הזורם במעגל חשמלי.

השטף וצפיפות השטף המגנטיים

סליל, נושא זרם, יוצר שדה מגנטי. אם מכניסים ליבת ברזל לתוך הסליל, הופכת הליבה למגנט ויוצרת קווי כוח מגנטיים משלה. אי לכך, ניתן לומר, כי השדה המגנטי, הנוצר על-ידי סליל בעל ליבת ברזל, מורכב מקווי הכוח המקוריים של הסליל ומקווי הכוח הנוספים, אשר נוצרו על-ידי ליבת הברזל.

את כלל קווי הכוח המגנטיים אנו מכנים ש ט ף מ ג נ ט י, אשר נהגים לסמנו באות (Φ).

יחידת השטף המגנטי קרויה "ו ו ב ר", סימונה [Wb] , ומציינת 10^8 קווי כוח מגנטיים.

בשם "צ פ י פ ו ת ה ש ט ף ה מ ג נ ט י" או "ה ש ר א ה מ ג נ ט י ת" אנו מכנים את מספר קווי הכוח המגנטיים החודרים דרך יחידת שטח הניצבת להם.

נוהגים לסמן את צפיפות השטף (ההשראה) באות (B), והואיל ויחידת השטף המגנטי היא "ווּבר", הרי יחידת צפיפות השטף תהיה ו ו ב ר - ל מ " ר [Wb/m^2] . ניתן לומר, כי אם דרך שטח של 1 מ"ר חודרים 10^8 קווי כוח מגנטיים, השטף המגנטי הוא 1 ווּבר וצפיפות השטף היא 1 ווּבר-למ"ר.

הנוסחא, המקשרת בין השטף המגנטי לבין צפיפות השטף המגנטי, היא:

$$\boxed{B = \frac{\Phi}{A}}$$

B : צפיפות השטף המגנטי (השראה מגנטית) ביחידות ווּבר-למ"ר [Wb/m^2]

Φ : השטף המגנטי ביחידות "ווּבר" [Wb]

A : שטח החתך של המעגל המגנטי ב-מ"ר [m^2]

דוגמא: השטף המגנטי דרך שטח חתך של 1 סמ"ר, בשדה מגנטי אחיד, הוא 0.0001 ווּבר.
חשב את צפיפות השטף ביחידות ווּבר-למ"ר.

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.0001}{1\times10^{-4}} = 1\ \frac{Wb}{m^2}$$

דוגמא: דרך טבעת ברזל בעלת שטח חתך של 4 סמ"ר, עליה כרוך סליל נושא זרם, עובר שטף בשיעור 0.0002 ווּבר. חשב את ההשראה.

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.0002}{0.0004} = 0.5\ \frac{Wb}{m^2}$$

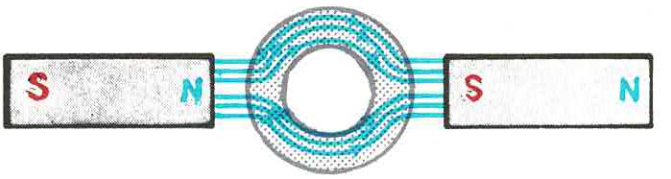
דוגמא: צפיפות השטף, בליבה של אלקטרומגנט, היא 0.2 ווברלמ"ר.
חשב את השטף, אם שטח החתך של הליבה הוא 1 סמ"ר.

אם נשנה את נושא הנוסחא האחרונה לחישוב השטף, נקבל:

$$\Phi = BA = 0.2 \times 0.0001 = 0.00002 = 2 \times 10^{-5} Wb$$

חלחלות מגנטית

ראינו בפרק י"ב, כי אם מניחים חפץ עשוי חומר פררומגנטי בקרבת מגנט, משנים קווי הכוח המגנטיים מסלולם וחודרים דרכו. ראינו כמו כן, כי אם מניחים לוחית עשויה חומר פררומגנטי על גבי הקטבים של מגנט פרסה, עוברים כל קווי הכוח דרך הלוחית. אם מכניסים טבעת ברזל בין שני קטבים מגנטיים מנוגדים, עוברים כל קווי הכוח דרך הטבעת ואינם עוברים דרך האוויר (ציור י"ד2).



ציור י"ד2

המסקנה הנובעת מכך היא, כי קווי הכוח המגנטיים חודרים ביתר קלות דרך הברזל מאשר דרך האוויר. אנו אומרים, כי **החלחלות** או **החדירות** של ברזל גבוהה מזו של אוויר. נהגים לסמן את החלחלות באות (μ).

ניתן לומר, כי השטף המגנטי (Φ) או ההשראה (B) נוצרים על-ידי הכוח-המגנטו-מניע (M) או על-ידי עוצמת השדה (H), שאינה אלא הכוח-המגנטו-מניע ליחידת אורך. ניתן אם כן לומר, כי ההשראה (B) תלויה בעוצמת השדה (H), ביחס ישר, וככל שעוצמת השדה תהיה גבוהה יותר, תהיה גם ההשראה חזקה יותר.

נוסף לכך, תלויה ההשראה (B) גם בחלחלות (μ) ביחס ישר, וככל שהחלחלות של החומר הפררומגנטי תהיה גבוהה יותר, כן תהיה חזקה יותר ההשראה.

אם נסכם ונאמר כי ההשראה המגנטית (צפיפות השטף) נמצאת ביחס ישר לערצמת השדה המגנטי ולחלחלות, נוכל לרשום:

$$B = \mu H$$

נשנה את נושא הנוסחא ונבטא את החלחלות כדי למצוא את יחידותיה:

$$\mu = \frac{B}{H} \qquad \frac{Wb/m^2}{AT/m} = \frac{Wb}{AT \times m}$$

החלחלות של הריק, אותה נוהגים לסמן (μ_o) , היא נמוכה:

$$\boxed{\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{AT \times m}}$$

לעומת זאת החלחלות של חומרים פררומגנטיים היא גבוהה, ובחומרים מסוימים היא גבוהה פי אלפים מהחלחלות של הריק.

כדי להשוות בין החלחלות (μ) של חומר כלשהו, הקרויה ח ל ח ל ו ת מ ו ח ל ט ת, לבין חלחלות הריק נהגים להעזר ב ח ל ח ל ו ת י ח ס י ת (μ_r) , המציינת את היחס בין החלחלות המוחלטת של החומר לבין חלחלות הריק (μ_o) .

$$\boxed{\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}}$$

אנו רואים, כי החלחלות היחסית משוללת יחידות ומציינת יחס מספרי בלבד.

הואיל והחלחלות של הריק היא מספר קבוע, נוכל, בכל מקרה, לחשב את החלחלות היחסית, כאשר ידועה החלחלות המוחלטת של החומר. כמו כן נוכל לחשב את החלחלות המוחלטת, כאשר ידועה החלחלות היחסית:

$$\boxed{\mu = \mu_o \mu_r}$$

דוגמא: החלחלות המוחלטת של חומר מסויים היא 62.8×10^{-5} ובר לאמפר-כריכות למטר. חשב את החלחלות היחסית של חומר זה.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu o} = \frac{62.8\times10^{-5}}{4\pi \times 10^{-7}} = \frac{62.8\times10^{-5}}{12.56\times10^{-7}} = 500$$

דוגמא: החלחלות של חומר מסוים גבוהה פי 1000 מחלחלות הריק.
חשב את החלחלות המוחלטת.

$$\mu = \mu_\circ \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \times 10^{3} = 4\pi \times 10^{-4} = 12.56 \times 10^{-4} \frac{Wb}{AT \times m}$$

החלחלות של האוויר ושל החומרים, שאינם נימנים על הקבוצה הפרורומגנטית, שוות בערכה לחלחלות הריק, ומסיבה זו החלחלות היחסית שלהם היא $\mu_r=1$ והחלחלות המוחלטת שלהם היא $\mu=\mu_\circ$.

נוכל לסכם עתה את הקשר בין צפיפות השטף (ההשראה) ועוצמת השדה המגנטיים:

$$\boxed{B = \mu H = \mu_\circ \mu_r H}$$

B : **צפיפות השטף המגנטי ביחידות ובר-למ"ר** $[Wb/m^2]$

H : **עוצמת השדה המגנטי באמפר-כריכות למטר** $[AT/m]$

$\mu_\circ$: **חלחלות הריק** $(4\pi \times 10^{-7})$ $[Wb/AT \times m]$

μ : **החלחלות המוחלטת של החומר באותן היחידות .**

μ_r : **החלחלות היחסית (מספר ללא יחידות).**

דוגמא: חשב את צפיפות השטף (ההשראה המגנטית) בתוך סליל ללא ליבת ברזל, אם עוצמת השדה בסליל היא 1000 אמפר-כריכות למטר.

$$B = \mu H = \mu_\circ \mu_r H = 4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 1000 = 12.56 \times 10^{-4} \frac{Wb}{m^2}$$

דוגמא: חשב את השטף ואת צפיפות השטף המגנטיים, בתוך סליל בעל ליבת אוויר, אם הסליל כרוך על גליל קרטון שקוטרו 4 ס"מ.

אורך הסליל 25 ס"מ, מספר כריכותיו 600 ועוצמת הזרם הזורם דרכו היא 0.5 אמפר.

נחשב תחילה את עוצמת השדה המגנטי:

$$H = \frac{IN}{\ell} = \frac{0.5 \times 600}{0.25} = 1200 \frac{AT}{m}$$

צפיפות השטף תהיה:

$$B = \mu_o \mu_r H = 4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 1200 = 48\pi \times 10^{-5} \ \frac{Wb}{m^2}$$

שטח החתך של ליבת האוויר:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times (0.04)^2}{4} = \frac{\pi \times 0.0016}{4} = 4\pi \times 10^{-4} \ m^2$$

והשטף יהיה:

$$\Phi = BA = 48\pi \times 10^{-5} \times 4\pi \times 10^{-4} = 192\pi^2 \times 10^{-9} = 18.93 \times 10^{-7} \ Wb$$

לאחר שהכרנו את המושג "חלחלות", ניתן להבין כיצד מתחזק השדה המגנטי של סליל, כאשר מכניסים לתוכו ליבת חומר פררומגנטי.

הואיל וההשראה המגנטית תלויה בחלחלות $(B = \mu H)$, הרי שככל שהחלחלות גבוהה יותר, גם ההשראה תהיה חזקה יותר.

החלחלות של החומרים הפררומגנטיים, אינה קבועה בשביל חומר מסוים, אלא תלויה בעוצמת השדה המגנטי בחומר. אי לכך, לא ניתן לחשב את שיעור ההשראה בליבה, אלא אם ידוע ערך החלחלות המתאים לעוצמת השדה בליבה.

דוגמא: דרך סליל עירור באורך 20 ס"מ, המורכב מ-500 כריכות, זורם זרם מיגנוט בעוצמה של 0.2 אמפר. בתוך הסליל, מצויה ליבת פלדה, בעלת שטח חתך של 10 סמ"ר. חשב את השטף בליבה, אם ידוע, שהחדירות היחסית במקרה זה היא 1000.

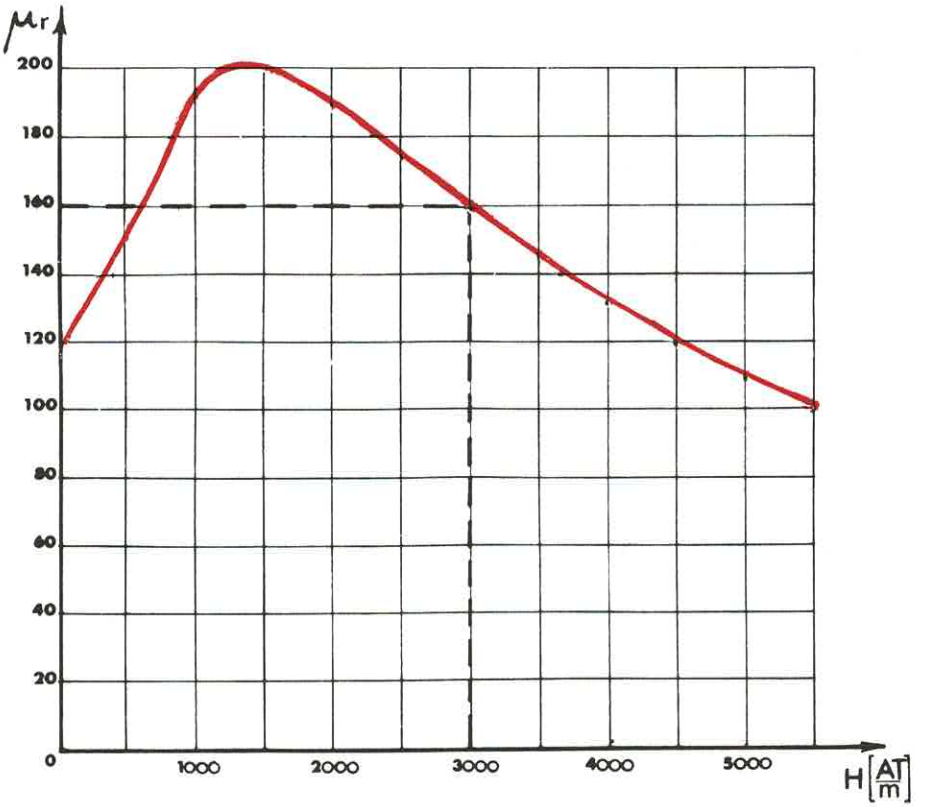
$$H = \frac{IN}{\ell} = \frac{0.2 \times 500}{0.20} = 500 \ \frac{AT}{m}$$

$$B = \mu H = \mu_o \mu_r H = 4\pi \times 10^{-7} \times 1000 \times 500 = 62.8 \times 10^{-2} \ \frac{Wb}{m^2}$$

$$\Phi = BA = 62.8 \times 10^{-2} \times 10 \times 10^{-4} = 62.8 \times 10^{-5} \ Wb$$

מקובל להשתמש בטבלאות ובאפיינים (גרפים) שונים, באמצעותם ניתן למצוא את הערך של החלחלות, בשביל חומרים שונים, בעוצמות שדה שונות.

בציור י"ד3 מופיע אפיין המתאר את החלחלות היחסית של יצקת ברזל בעוצמות שדה שונות.



ציור י"ד3

דוגמא: בסליל, שאורכו 40 ס"מ ונושא זרם בעוצמה של 2 אמפר, מצויה ליבה עשויה יצקת ברזל. חשב את ההשראה בליבה, אם מספר הכריכות בסליל הוא 600 .

$$H = \frac{IN}{\ell} = \frac{2\times600}{0.40} = 3000\ \frac{AT}{m}$$

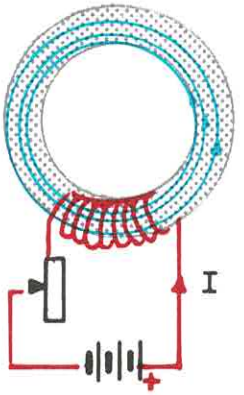
אם נתבונן באפיין שבציור י"ד3 נראה, כי בעוצמת שדה של 3000 אמפר כריכות למטר, החלחלות היחסית של יצקת ברזל היא $\mu_r = 160$.

$$B = \mu_o\mu_r H = 4\pi\times10^{-7}\times160\times3000 \cong 0.6\ \frac{Wb}{m^2}$$

השראה מגנטית בחומרים פררומגנטיים

כפי שכבר ראינו, תלויה ההשראה המגנטית (B) בעוצמת השדה המגנטי (H) ; נסביר עתה את מהות הקשר ביניהם.

כורכים סליל בעל (N) כריכות על גבי טבעת פלדה (ציור י"ד4).



ציור י"ד4

הואיל ומספר הכריכות (N) הוא קבוע, ניתן לשנות את עוצמת השדה (H) בטבעת, על-ידי שינוי עוצמת זרם המיגנוט (I) בסליל. את שינוי עוצמת הזרם משיגים באמצעות הנגד המשתנה המחובר במעגל.

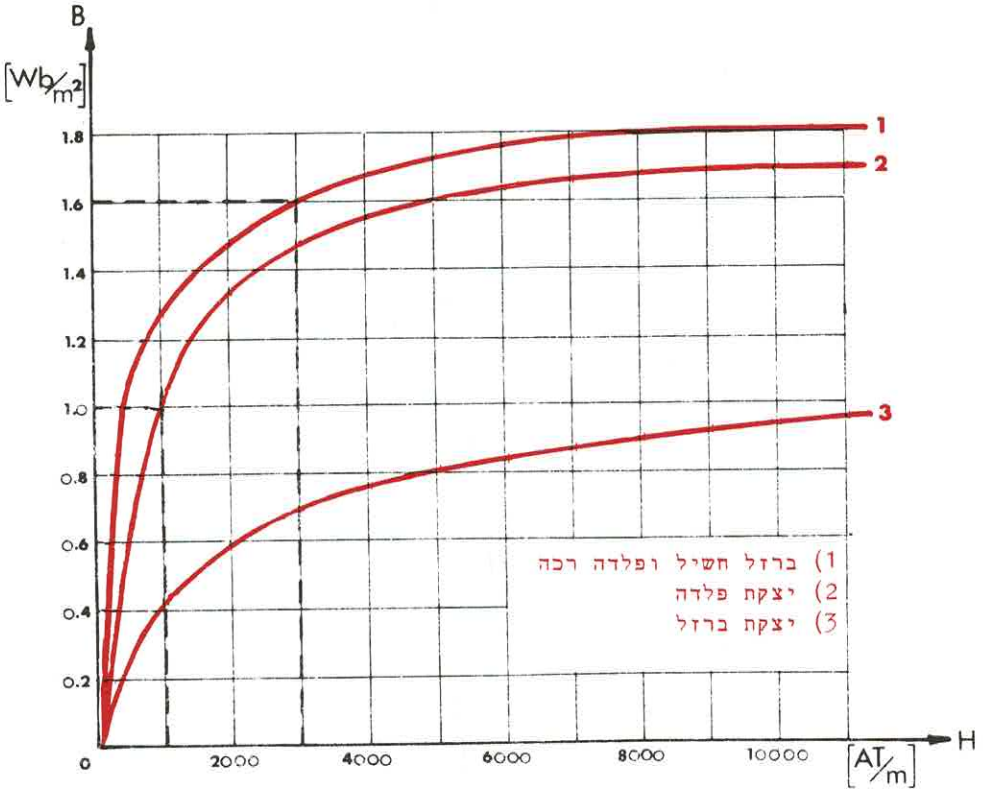
ככל שמגדילים את עוצמת השדה המגנטי, גדלה גם ההשראה, אך עד גבול מסוים. אם נוסיף ונגדיל את עוצמת השדה, תשתנה ההשראה אך מעט.

אנו אומרים, כי במצב זה הפלדה מצויה במצב רוויה. ראינו בפרק י"ב, כי מצב רוויה נוצר, כאשר כל המגנטים הזעירים, המרכיבים את החומר הפררומגנטי, מסודרים באותו כיוון.

בציור י"ד5 מופיעה משפחת אפיינים, הקרויים "עקומות מיגנוט", של פלדות שונות.

אילו היתה החלחלות קבועה, היתה משפחת האפיינים משפחה של קווים ישרים. החלחלות אינה קבועה, כפי שראינו, אלא פוחתת עם גבור עוצמת השדה המגנטי, ומסיבה זו לאפיינים הצורה, כפי שמתואר בציור י"ד5.

משפחת האפיינים, אשר בציור י"ד5, מתארת את הקשר הקיים בין עוצמת השדה המגנטי (H) לבין ההשראה המגנטית (B). אם ברשותנו אפיינים מסוג זה, ניתן למצוא את ההשראה (B), כאשר ידועה עוצמת השדה (H), ללא ידיעת החלחלות (μ). וגם להיפך: ניתן למצוא את עוצמת השדה, כאשר ידועה ההשראה.



ציור י"ד5

דוגמא: מה תהיה ההשראה המגנטית בליבת סליל עשויה פלדה רכה, אם אורך הסליל הוא 20 ס"מ, מספר כריכותיו 1200, והוא נושא זרם מיגנוט בעוצמה של 0.5 אמפר.

נחשב תחילה את עוצמת השדה המגנטי בליבה:

$$H = \frac{IN}{\ell} = \frac{0.5\times1200}{0.20} = 3000\ \frac{AT}{m}$$

אם נתבונן באפיין בציור י"ד5, המתאים לפלדה רכה, ניווכח, כי ההשראה בליבה תהיה: $B = 1.6\ \frac{Wb}{m^2}$

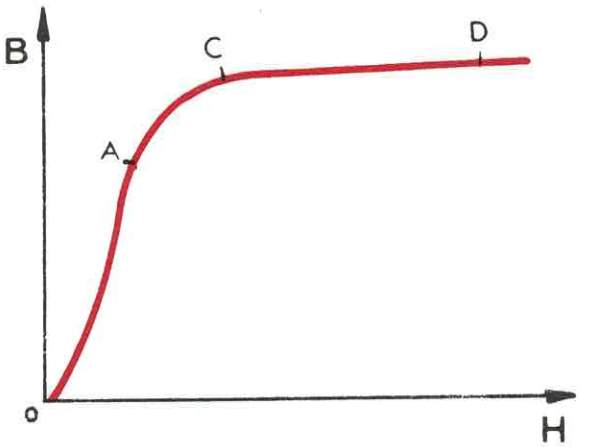
דוגמא: איזו עוצמת זרם יש להזרים דרך סליל המורכב 100 כריכות, אם הוא כרוך על ליבה עשויה יצקת פלדה שאורכה 10 ס"מ, על מנת שההשראה בליבה תהיה 1 ובר-למ"ר.

מהאפיין המתאים ליצקת פלדה (ציור י"ד5) נובע, שכדי לקבל השראה של 1 ובר-למ"ר אנו זקוקים לעוצמת שדה בשיעור 1000 אמפר-כריכות למטר. לכן:

$$H = \frac{IN}{\ell} \quad ; \quad I = \frac{H\ell}{N} = \frac{1000\times0.1}{100} = 1A$$

לולאת המיגנוט

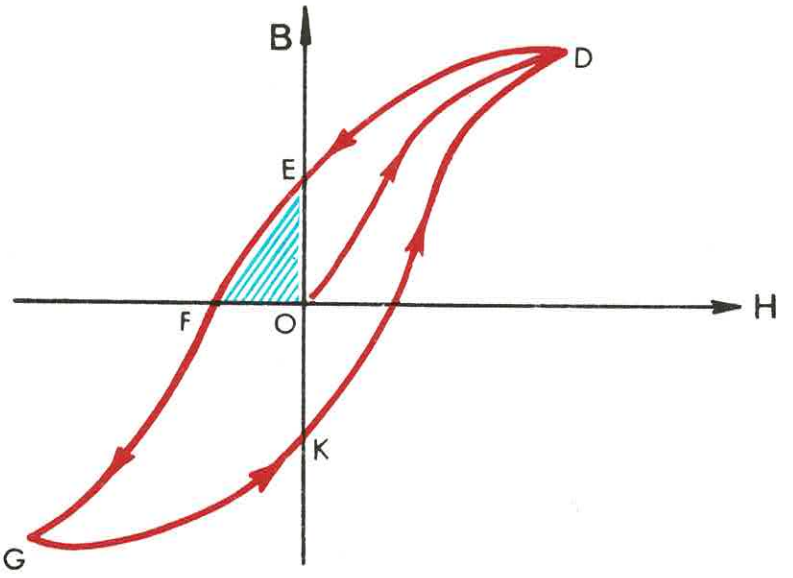
נתייחס שוב למעגל המגנטי, המופיע בציור י"ד4. כל עוד אין זרימת זרם מיגנוט במעגל, הערך של עוצמת השדה המגנטי הוא אפס, ומסיבה זו גם ערך ההשראה המגנטית הוא אפס (ציור י"ד6).



ציור י"ד6

מתחילים להעלות את עוצמת הזרם בהדרגה, עוצמת השדה עולה, והמגנטים הזעירים, המרכיבים את הליבה, מתחילים להסתדר, וכתוצאה מכך מופיעה בליבה השראה מגנטית, העולה עם עליית עוצמת הזרם (הקטע OA). בתחום זה לאפיין צורת קו ישר נטוי, לכן גורמים שינויים קטנים בעוצמת השדה לשינויים גדולים בהשראה. משהסתדרו מרבית המגנטים הזעירים, מקבל האפיין צורת ברך (הקטע AC), ובתחום זה גורמים שינויים גדולים בעוצמת השדה לשינויים קטנים בהשראה. אם ממשיכים ומעלים את עוצמת השדה, מגיעה הליבה למצב רוויה (הקטע CD), ובתחום זה שינויים מאד גדולים בעוצמת השדה גורמים לשינויים מאד קטנים בהשראה, הואיל ותוספת ההשראה נובעת, בתחום זה, מהשדה המקורי של הסליל ולא ממיגנוט הליבה.

לאחר שמגיעים לערך מסוים של עוצמת זרם מיגנוט בסליל, מתחילים להקטינה וכתוצאה מכך קטנה עוצמת השדה באותו היחס. לעומת זאת אין ההשראה קטנה לפי אותו יחס, אלא לפי הקו DE (ציור י"ד7). כאשר ערך עוצמת השדה יורד לאפס עדיין נשארת השראה מסוימת בשיעור OE אותה נהגים לכנות "מ ג נ ט י ו ת נ ו ת ר ת" או "מ ג נ ט י ו ת ש י ו ר י ת" והתכונה של החומר הפררומגנטי היוצרת תופעה זו קרויה "מ ו ת י ר ו ת".



ציור י"ד7

אם נשנה עתה את מגמת הזרימה של זרם המיגנוט בסליל, על-ידי הפיכת הקוטביות של המקור, ונגדיל בהדרגה את עוצמת הזרם, תלך עוצמת השדה ותגדל בכיוון הפוך, ההשראה תלך ותרד לפי הקו EF עד לאפס.

עוצמת השדה בקטע OF, אשר גרמה לירידת ההשראה לאפס, קרויה " כ ו ח ק ו א ר ס ט י ב י" והתכונה של החומר, הקובעת את שיעור העוצמה, בקטע OF קרויה "כ פ י י נ ו ת".

ממשיכים להעלות את עוצמת הזרם ומגיעים לרוויה בנקודה G. מקטינים שוב את עוצמת הזרם, וההשראה משתנה לפי הקו GK. משנים שוב את מגמת זרימת הזרם, על-ידי הפיכת קוטביות המקור, מעלים את עוצמת הזרם בהדרגה ובעיקבות זאת משתנה ההשראה לפי הקו KD.

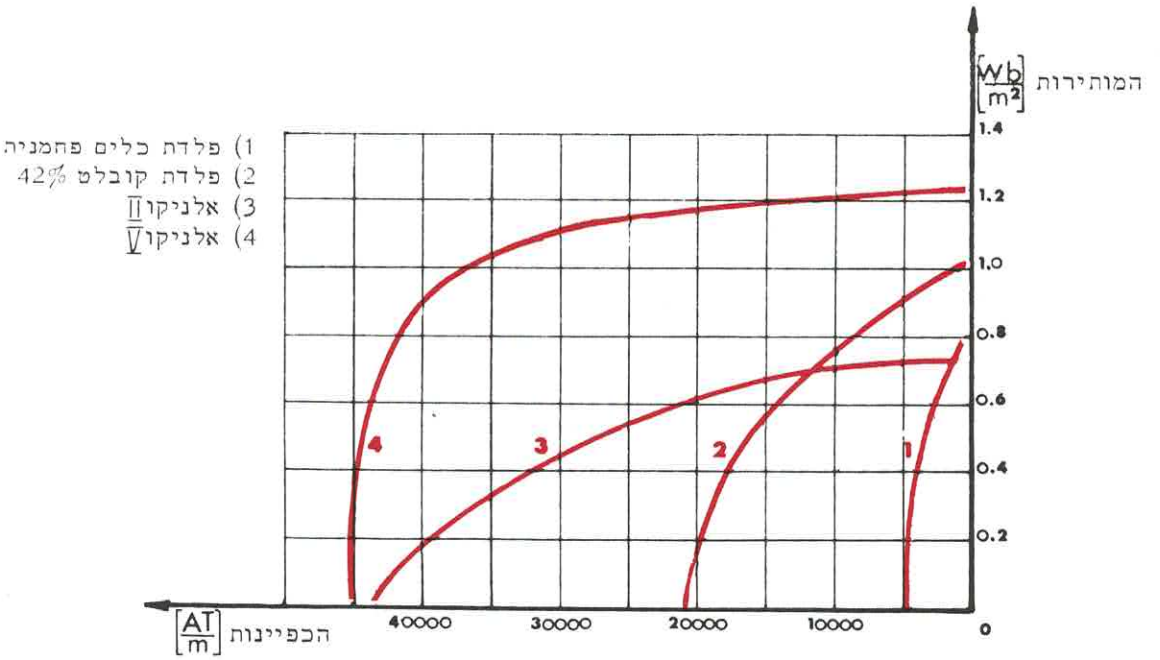
קיבלנו לולאה סגורה, הקרויה **לולאת המיגנוט** או **עניבת המיגנוט**.

תכונות המותירות והכפיינות של חומרים פררומגנטיים חשובות מאד בייצור מגנטים. במגנטים ארעיים מעוניינים, שהמותירות והכפיינות יהיו נמוכים ככל האפשר. לעומתם בייצור מגנטים קבועים מעוניינים שהחומר הפררומגנטי, המשמש לייצור המגנטים, יהיה בעל מותירות גבוהה ככל האפשר, על מנת שהמגנטיות השיורית שלו, לאחר הפסקת פעולות המיגנוט, תהיה גבוהה.

הואיל והכפיינות מציינת את עוצמת השדה, הדרושה להפגת המגנטיות, הרי שככל שהכפיינות של חומר פררומגנטי גבוהה יותר, נוטה החומר לשמור על המגנטיות שלו. מסיבה זו חשוב, שגם הכפיינות של חומר, המיועד לייצור מגנטים קבועים, תהיה גבוהה ככל האפשר.

ניתן לסכם ולומר, כי חומרים מתאימים לייצור מגנטים קבועים הם אלה בעלי מותירות וכפיינות גבוהים, או במילים אחרות: בעלי שטח FOE גדול ככל האפשר (ציור י"ד7).

בציור י"ד8 מופיעים אפיינים המתארים קטע מוגדל של לולאת המיגנוט של חומרים פררומגנטיים, המתאימים לייצור מגנטים קבועים.



ציור י"ד8

מבין החומרים, המופיעים בגרף שבציור י"ד8, המתאים ביותר לייצור מגנטים קבועים הוא אלניקו $\overline{V}$, בעל מותירות של 1.25 ווּבר למ"ר ובעל כפיינות של 44000 אמפר-כריכות למטר.

ה ח ש ל (היסטרזיס)

כפי שראינו, כאשר התייחסנו ללולאת המיגנוט, למרות שעוצמת השדה המגנטי יורדת עד לאפס, ההשראה המגנטית נשארת בעלת ערך מסויים, והיא יורדת לאפס רק לאחר שעוצמת השדה עלתה בכיוון הפוך. ניתן לומר, כי ההשראה המגנטית מפגרת אחר עוצמת השדה המגנטי. תופעה זו קרויה " ח ש ל" או "ה י ס ט ר ז י ס", ולולאת המיגנוט קרויה גם "ל ו ל א ת ה ח ש ל".

בזרם חילופין, משתנה עוצמת הזרם, וכן גם מגמת זרימת הזרם בהתאם לתדירות; אי לכך, אם מזרימים זרם מיגנוט חילופין דרך סליל, בעל ליבה עשויה חומר פררומגנטי, נוצרים הפסדים של אנרגיה, המושקעת כדי להתגבר על המותירות של החומר. הפסדים אלה קרויים "ה פ ס ד י ח ש ל" והם מתבטאים בפליטת חום.

הפסדי החשל תלויים בסוג החומר הפררומגנטי, כלומר בצורה של לולאת החשל, בתדירות, או במילים אחרות: במספר הפעמים שזרם המיגנוט משנה את כיוון הזרימה שלו בשניה אחת, ובנפח החומר הפררומגנטי.

במכונות חשמל חשוב במיוחד לצמצם את הפסדי החשל ככל האפשר. אי לכך יש לדאוג, שהחומרים הפררומגנטיים, המצויים בשדה המגנטי של המכונה, יהיו בעלי לולאת מיגנוט צרה ונמוכה ככל האפשר.

לולאה צרה ונמוכה מתקבלת, כאשר הערך המירבי של ההשראה הוא נמוך והכפיינות נמוכה.

בטבלה הבאה מופיעים חומרים פררומגנטיים בעלי הפסדי חשל נמוכים.

הכפיינות [AT/m]	המותירות [Wb/m²]	ה ח ו מ ר
4.0	1.36	ברזל טהור
4.0	0.6	פרמאלוי (78.5% ניקל)
4.0	0.5	מומטל (74 % ניקל)
40.0	0.5	פלדת סיליקון 4.5%
56.0	0.85	פלדת סיליקון 1%
160.0	1.4	פרמנדור
880.0	0.55	יצקת ברזל מרופה

שטיינמץ מצא, באופן נסיוני, כי הפסדי החשל נמצאים ביחס ישר להשראה המגנטית בחזקת 0.6 ופיתח נוסחא באמצעותה ניתן לחשב את ההפסדים.

$$P_h = kVfB_{max}^{1.6}$$

P_h : הפסדי החשל בוטים [W]

k מקדם הפסדי החשל של שטיינמץ ביחידות ז'ול למטר מעוקב ולוובר-למ"ר $\left[\frac{J}{m^3 \times Wb/m^2}\right]$

V : נפח החומר הפרומגנטי במטרים מעוקבים $[m^3]$

f : תדירות הזרם בהרץ [1/sec]

Bmax : ההשראה המירבית בוובר למטרים מרובעים $[Wb/m^2]$

המקדם של שטיינמץ (k) מציין את הפסדי החשל בוטים לכל מ"ק של חומר פרומגנטי מסוג מסויים, במחזור אחד, כאשר ההשראה המירבית בחומר היא בשיעור של ווובר אחד למ"ר.

ככל שהחומר הפרומגנטי קשה יותר, לולאת החשל שלו היא בעלת שטח גדול יותר, וכתוצאה מכך יהיו הפסדי החשל גבוהים יותר. לחומרים פרומגנטיים קשים, מקדם (k) גבוה.

לדוגמא: בשביל פלדה קשה $k \cong 7000 \frac{J}{m^3 \times Wb/m^2}$

בשביל פלדה רכה $k \cong 500 \frac{J}{m^3 \times Wb/m^2}$

דוגמא: חשב את ההספק ההולך לאיבוד, בגלל הפסדי חשל, בגוף העשוי פלדה קשה, שנפחו 400 סמ"ר אם ההשראה המירבית בגוף היא 1 ווברלמ"ר ותדירות הזרם, היוצר את ההשראה, היא 50 הרץ.

$$P_h = kVfB_{max}^{1.6} = 7000 \times 400 \times 10^{-6} \times 50 \times 1^{1.6} = 280W$$

המעגל המגנטי

כפי שראינו, הסיבה ליצירת שטף מגנטי במעגל מגנטי הוא הכוח-המגנטו-מניע, ניתן להשוות את הכוח-המגנטו-מניע. במעגל מגנטי, לכוח-האלקטרו-מניע במעגל חשמלי ואת השטף המגנטי לעוצמת הזרם החשמלי.

לכל חומר מוליך תכונה להתנגד למעבר זרם חשמלי וכיוצא בזה, לכל חומר פררומגנטי תכונה להתנגד למעבר השטף המגנטי. תכונה זו, שאינה אלא התנגדות מגנטית, קרויה "מ י א ו ן" (רלוקטנס) ונהגים לסמנה (R_m).

נרשום, אם כן, את חוק אום למעגלים מגנטיים:

$$\Phi = \frac{M}{R_m}$$

חוק זה קובע, כי השטף המגנטי, במעגל מגנטי, נמצא ביחס ישר לכוח-המגנטו-מניע וביחס הפוך למיאון (התנגדות מגנטית).

נבטא עתה את R_m ונמצא את יחידתו:

$$R_m = \frac{M}{\Phi} \quad ; \quad \frac{[AT]}{[Wb]} = \left[\frac{AT}{Wb}\right]$$

אנו רואים, כי יחידת המיאון היא: אמפר-כריכות לוובר.

גוכל לסכם ולרשום:

$$\boxed{\Phi = \frac{M}{R_m}}$$

Φ : השטף המגנטי ביחידות "ווبר" [Wb]

M : הכוח-המגנטו-מניע באמפר-כריכות [AT]

R_m : המיאון באמפר-כריכות לווبר [AT/Wb]

דוגמא: הכוח-המגנטו-מניע, במעגל מגנטי, הוא 1000 אמפר-כריכות והמיאון הוא 500 000 אמפר-כריכות לווبר. חשב את השטף המגנטי.

$$\Phi = \frac{M}{R_m} = \frac{1000}{500000} = 2 \times 10^{-3}\text{Wb}$$

דוגמא: מה צריך להיות הכוח-המגנטו-מניע, על מנת שבמעגל מגנטי, שהמיאון שלו הוא 10^6 אמפר-כריכות לווبר, יעבור שטף של 10^{-4} ווبר?
איזו עוצמת זרם יש להזרים בסליל, אם מספר הכריכות שלו הוא 500?

$$M = \Phi R_m = 10^{-4} \times 10^6 = 10^2 = 100\text{AT}$$

$$I = \frac{M}{N} = \frac{100}{500} = 0.2\text{A}$$

תלות המיאון בסוג הליבה ומידותיה

ניתן להשוות את החלחלות (μ) של חומר פררומגנטי למוליכות הסגולית (γ) של חומר מוליך.

המוליכות הסגולית (γ) קובעת את תכונת החומר להוליך זרם חשמלי, החלחלות (μ) קובעת את תכונת החומר להוליך שטף מגנטי.

כפי שראינו בפרק ג' התנגדותו של מוליך נמצאת ביחס ישר לאורכו וביחס הפוך למוליכות הסגולית ולשטח החתך:

$$R = \frac{1}{\gamma}\frac{\ell}{A}$$

בדומה לזה, המיאון של החומר נמצא ביחס ישר לאורכו וביחס הפוך לחלחלות שלו ולשטח החתך:

$$R_m = \frac{1}{\mu}\frac{\ell}{A}$$

R_m : המיאון ביחידות אמפר-כריכות לוובר [AT/Wb]

ℓ : אורך המסלול המגנטי במטרים [m]

μ : החלחלות של החומר ביחידות ווובר לאמפר-כריכות למטר [Wb/AT×m]

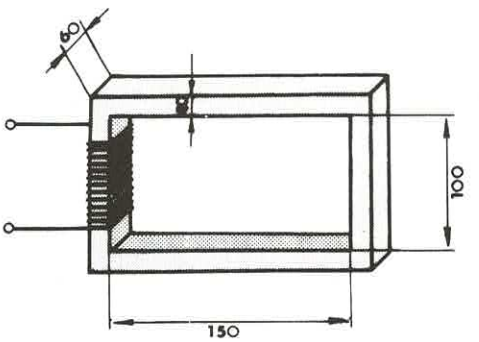
A : שטח החתך של המעגל המגנטי במ"ר. [m^2]

נבדוק עתה את זהות היחידות בשני צדי סימן השוויון

$$R_m = \frac{\ell}{\mu A} \quad ; \quad \left[\frac{AT}{Wb}\right] = \frac{[m]}{[Wb/AT\times m]\times[m^2]} = \frac{[m]\times[AT]\times[m]}{[Wb]\times[m^2]} = \left[\frac{AT}{Wb}\right]$$

לאור הנוסחא האחרונה אפשר לומר, שככל שהמסלול המגנטי ארוך יותר, המיאון שלו יהיה גבוה יותר, וככל שהחלחלות ושטח החתך של החומר, ממנו בנוי המעגל המגנטי, יהיו נמוכים יותר, המיאון יהיה גבוה יותר.

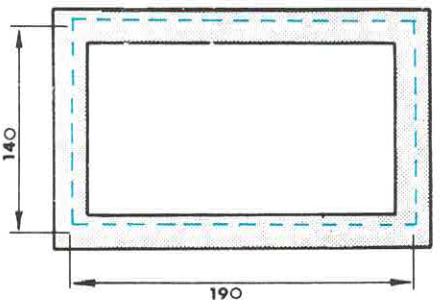
דוגמא: בתרשים שלפניך (ציור י"ד9) מופיע מעגל מגנטי, אשר מידותיו נתונות במ"מ.
חשב את המיאון של המעגל, אם החלחלות היחסית של החומר היא $\mu_r = 275$.
שטח החתך של המעגל המגנטי הוא :



ציור י"ד9

$$A = 6 \times 4 = 24cm^2 = 24 \times 10^{-4} m^2$$

בחישוב אורך המסלול המגנטי לוקחים בחשבון את האורך הממוצע (ציור י"ד10) .



ציור י"ד10

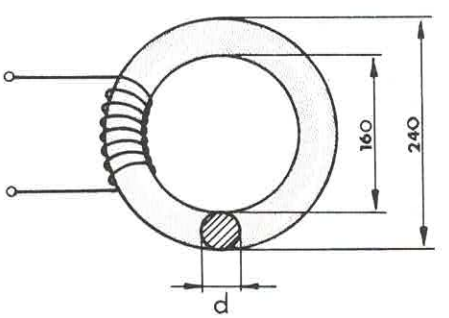
לכן אורך המסלול המגנטי יהיה:

$$\ell = 2 \times 14 + 2 \times 19 = 28 + 38 = 66\text{cm} = 0.66\text{m}$$

נוכל לחשב עתה את המיאון:

$$R_m = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{\ell}{\mu_o \mu_r A} = \frac{66 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 275 \times 24 \times 10^{-4}} \cong 8 \times 10^5 \ \frac{AT}{Wb}$$

דוגמא: חשב את המיאון של הטבעת, בעלת שטח חתך עגול, אשר מידותיה נתונות במ"מ בציור י"ד11. החלחלות היחסית של החומר היא : $\mu_r = 100$.

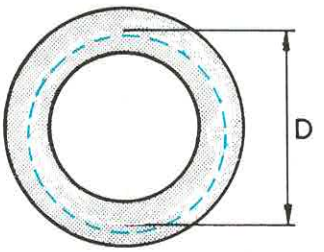


ציור י"ד11

שטח החתך של המעגל המגנטי הוא:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 4^2 \times 10^{-4}}{4} = 4\pi \times 10^{-4} m^2$$

בחישוב אורך המסלול המגנטי לוקחים בחשבון את הקוטר הממוצע (ציור י"ד12).



ציור י"ד12

$$D = \frac{160 \times 240}{2} = \frac{400}{2} = 200mm$$

$$\ell = \pi D = \pi \times 20 \times 10^{-2} m$$

$$R_m = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{\ell}{\mu_o \mu_r A} = \frac{\pi \times 20 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 10^2 \times 4\pi \times 10^{-4}} \cong 4 \times 10^6 \frac{AT}{Wb}$$

נוסחאת הופקינסון למעגל מגנטי

הכרנו שתי נוסחאות. אחת מהן היא נוסחאת אום למעגלים מגנטיים:

$$\Phi = \frac{M}{R_m}$$

והנוסחא השנייה היא זו המתאימה לחישוב המיאון של מעגל מגנטי:

$$R_m = \frac{\ell}{\mu A}$$

אם נציב את הנוסחא השנייה בראשונה, נקבל נוסחא, שבאמצעותה ניתן לחשב את השטף, במעגל מגנטי, כאשר ידועים הכוח-המגנטו-מניע, מידותיה של הליבה והחלחלות של החומר. נוסחא זו קרויה נוסחאת הופקינסון.

$$\boxed{\Phi = \frac{M}{\ell/\mu A}}$$

Φ : השטף המגנטי ביחידות "וובר" [Wb]

M : הכוח-המגנטו-מניע באמפר-כריכות [AT]

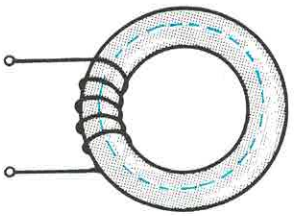
ℓ : אורך המסלול המגנטי במטרים [m]

A : שטח החתך של המעגל המגנטי במ"ר [m^2]

μ : החלחלות המוחלטת של החומר ביחידות וובר לאמפר-כריכות למטר [Wb/AT×m]

דוגמא : חשב את השטף ואת ההשראה בטבעת, המופיעה בציור י"ד13, אם האורך הממוצע של המסלול הוא 0.628 מטר, שטח החתך של הטבעת 10 סמ"ר והכוח-המגנטו-מניע 400 אמפר-כריכות.

כך בחשבון, כי החלחלות היחסית במקרה זה היא $\mu_r = 250$.



ציור י"ד13

$$\Phi = \frac{M}{\ell/\mu A} = \frac{M\mu_o\mu_r A}{\ell} = \frac{400\times4\pi\times10^{-7}\times250\times10\times10^{-4}}{0.628} = 20\times10^{-5}\text{Wb}$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{20\times10^{-5}}{10\times10^{-4}} = 0.2\ \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

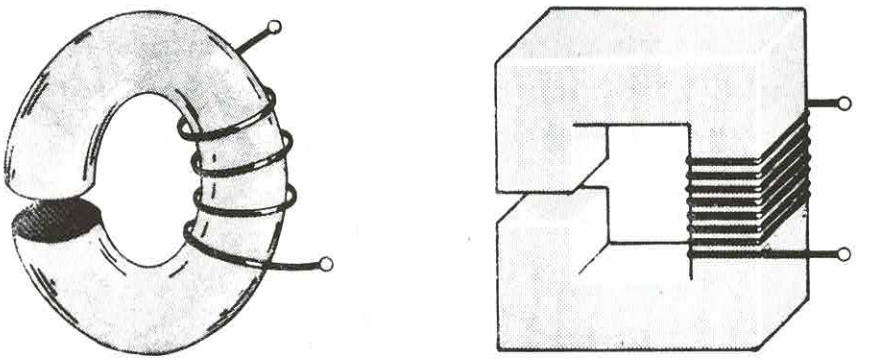
דוגמא: סליל בעל 1000 כריכות, הנושא זרם שעוצמתו 0.5 אמפר, כרוך על ליבת עץ, בצורת טבעת, שהיקפה הממוצע הוא 60 ס"מ ושטח החתך שלה הוא 10 סמ"ר .

חשב את השטף בלב הסליל.

$$\Phi = \frac{M}{\ell/\mu A} = \frac{M\mu_o A}{\ell} = \frac{0.5\times1000\times4\pi\times10^{-7}\times10\times10^{-4}}{60\times10^{-2}} \cong 1.05\ 10^{-6}\text{Wb}$$

המעגל המגנטי הטורי

מעגלים מגנטיים עשויים לכלול: חריץ אוויר, קטעים העשוים חומרים שונים או שמידותיהם שונות. בציור י"ד14 מופיעות שתי ליבות בעלות חריץ אוויר.



ציור י"ד14

במקרה כזה מתייחסים לכל קטע, של המעגל המגנטי, בנפרד ומחשבים את המיאון שלו.

<u>המיאון השקול, של מעגל מגנטי טורי, שווה לסכום המיאונים של הקטעים המרכיבים את המעגל המגנטי.</u>

$$\boxed{R_{mT} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \ldots}$$

דוגמא: מעגל מגנטי טורי מורכב משלושה קטעים בעלי המיאונים הבאים:

$R_{m1} = 5\times10^5 \text{AT/Wb}$ $\quad R_{m2} = 2\times10^6 \text{AT/Wb}$ $\quad R_{m3} = 3\times10^4 \text{AT/Wb}$

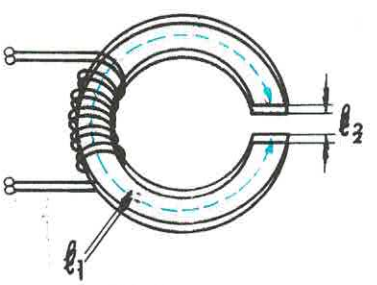
חשב את המיאון השקול של המעגל.

$$R_{mT}=R_{m1}+R_{m2}+R_{m3}=5\times10^5+2\times10^6+3\times10^4=50\times10^4+200\times10^4+3\times10^4=253\times10^4\frac{AT}{Wb}$$

אם נציב את הנוסחא האחרונה בנוסחאת אום למעגלים מגנטיים נקבל:

$$\Phi=\frac{M}{R_{mT}}=\frac{M}{R_{m1}+R_{m2}+\dots}=\frac{M}{\ell_1/\mu_1A_1+\ell_2/\mu_2A_2+\dots}$$

דוגמא: חשב את השטף בטבעת, המופיעה בציור י"ד15, אם אורך המסלול המגנטי של הליבה הוא $\ell_1 = 20cm$ ורוחב חריץ האוויר הוא $\ell_2 = 0.2cm$ הכוח-המגנטו-מניע הוא 1000 אמפר-כריכות, החלחלות היחסית של ליבת הפלדה היא 100, ושטח החתך של הליבה הוא אחיד ושווה 5 סמ"ר.



ציור י"ד15

$$R_{m1}=\frac{\ell_1}{\mu_1A_1}=\frac{20\times10^{-2}}{4\pi\times10^{-7}\times100\times5\times10^{-4}}=\frac{10^7}{\pi}\frac{AT}{Wb}$$

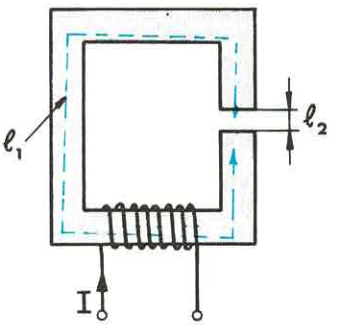
$$R_{m2}=\frac{\ell_2}{\mu_2A_2}=\frac{0.2\times10^{-2}}{4\pi\times10^{-7}\times5\times10^{-4}}=\frac{10^7}{\pi}\frac{AT}{Wb}$$

$$\Phi=\frac{M}{R_{m1}+R_{m2}}=\frac{1000}{10^7/\pi+10^7/\pi}=\frac{1000\pi}{2\times10^7}=1570\times10^{-7}=15.7\times10^{-5}Wb$$

דוגמא: במעגל המגנטי, שבציור י"ד16, מעוניינים ליצור שטף שצפיפותו בחריץ האוויר היא $B = 1.25\ Wb/m^2$.

חשב את מספר הכריכות הדרוש, אם עוצמת הזרם בסליל היא 8 אמפר והחלחלות היחסית של הפלדה היא 800.

אורך המסלול המגנטי הממוצע הוא $\ell_1 = 20cm$ ורוחב חריץ האוויר 0.6cm .



ציור י"ד16

הואיל ומדובר בצפיפות השטף, הרי שהשטח הוא 1 מ"ר. נוכל לרשום:

$$B = \frac{M}{\ell_1/\mu_1 + \ell_2/\mu_2} = \frac{IN}{\ell_1/\mu_1 + \ell_2/\mu_2}$$

נשנה את נושא הנוסחא לחישוב מספר הכריכות ונקבל:

$$N = \frac{B}{I}\left(\frac{\ell_1}{\mu_1} + \frac{\ell_2}{\mu_2}\right) = \frac{1.25}{8}\left(\frac{20 \times 10^{-2}}{4\pi\times10^{-7}\times 800} + \frac{0.6 \times 10^{-2}}{4\pi\times10^{-7}}\right) \cong 780$$

חוק קירכהוף למעגל מגנטי טורי

ראינו בפרק ח' כי הכוח-האלקטרו-מניע במעגל חשמלי טורי שווה לסכום מפלי המתח במעגל. הווה אומר, שהכוח-האלקטרו-מניע שווה לסכום המתחים הדרושים כדי להזרים את הזרם דרך כל אחד ממרכיבי המעגל הטורי.

באופן דומה, ניתן לחשב בנפרד את הכוחות-המגנטו-מניעים, הדרושים כדי לאפשר מעבר שטף מגנטי, דרך כל אחד ממרכיבי המעגל המגנטי הטורי. הכוח-המגנטו-מניע השקול ישווה לסכום הכוחות-המגנטו מניעים החלקיים.

כפי שראינו: $H = M/\ell$ ומכאן: $M = H\ell$

נוכל לרשום: $M = M_1 + M_2 + M_3 + \ldots$

או:

$$\boxed{M = H_1\ell_1 + H_2\ell_2 + H_3\ell_3 + \ldots}$$

דוגמא: מסלול מגנטי מורכב טבעת ברזל בעלת חריץ אוויר. אורך המסלול המגנטי בברזל הוא 1 מ' ורוחב חריץ האוויר 1 מ"מ.
חשב את הכוח-המגנטו-מניע (אמפר-כריכות) הדרוש כדי ליצור השראה של 1.256 ובר-למ"ר, אם שטח החתך של הטבעת הוא 10 סמ"ר והחלחלות היחסית של הברזל בתנאים אלה היא 1000 .

$$M_1 = H_1\ell_1 = \frac{B}{\mu_1}\ell_1 = \frac{1.256 \times 1}{4\pi\times10^{-7}\times1000} = 1000AT$$

$$M_2 = H_2\ell_2 = \frac{B}{\mu_2}\ell_2 = \frac{1.256 \times 10^{-3}}{4\pi\times10^{-7}} = 1000AT$$

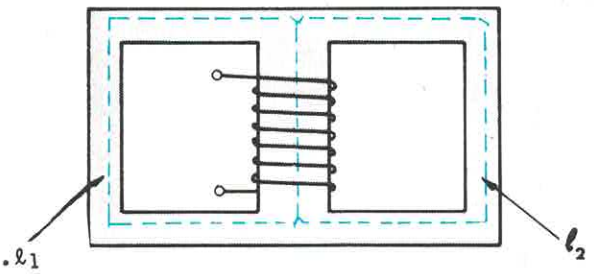
$$M = M_1 + M_2 = 1000 + 1000 = 2000AT$$

המעגל המגנטי המקבילי

במעגל מגנטי מקבילי - לשטף המגנטי שני מסלולים או יותר.

בציור י"ד17 מופיע מעגל מגנטי בעל שני מסלולים. השטף המגנטי, הנוצר על-ידי הסליל, מתחלק לשני חלקים.

על מנת שצפיפות השטף תהיה אחידה בכל שטח חתך של המסלול המגנטי, מייצרים את הגוף באופן כזה, שהזרוע האמצעית, עליה כרוך הסליל, תהיה בעלת שטח חתך כפול מזה של הזרועות הצדדיות.



ציור י"ד17

דוגמא: בהתייחס לציור י"ד17, אורך המסלול המגנטי הוא $\ell_1 = \ell_2 = 30cm$.
שטח החתך של הזרוע האמצעית הוא 20 סמ"ר ושל כל אחת מהזרועות הצדדיות 10 סמ"ר.
מה צריכה להיות עוצמת השדה בסליל, אם אנו מעוניינים בשטף של 32×10^{-4} ווב בזרוע האמצעית?
מספר הכריכות הוא 300 והגוף בנוי פלדה רכה.

הואיל והגוף הוא סימטרי, ניתן לראות את שני המסלולים כמסלול אחד בעל אורך של 30 ס"מ ובעל שטח חתך אחיד של 20 סמ"ר.

נחשב תחילה את צפיפות השטף:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{32 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-4}} = 1.6 \ \frac{Wb}{m^2}$$

את עוצמת השדה נמצא באמצעות האפיין המתאים לפלדה רכה (ציור י"ד5):

$$H = 3000 \ \frac{AT}{m}$$

כפי שנזכר:

$$H = \frac{M}{\ell} = \frac{IN}{\ell}$$

נשנה את נושא הנוסחא לחישוב עוצמת הזרם ונציב את הנתונים:

$$I = \frac{H\ell}{N} = \frac{3000 \times 30 \times 10^{-2}}{300} = 3A$$

שאלות סיכום ובעיות לפרק יד

בחן את ידיעותיך

לפניך אוסף שאלות ברירה, ולכל שאלה מספר תשובות, אשר רק אחת מהן נכונה. עליך לבחור את התשובה הנכונה, ולסמן אותה על דף נפרד. לאחר מכן השווה את תשובותיך עם התשובות, המצויות בסוף הספר כדי לקבוע עד כמה מובן לך החומר אשר למדת.

י"ד1) מעגל מגנטי הוא:

א) אוסף מגנטים זעירים, המחוברים ביניהם במעגל.
ב) מסלול סגור, הכולל את כלל קווי הכוח המגנטיים.
ג) המעגל המורכב מסליל של אלקטרומגנט ומקור מתח.
ד) תאור של קו כוח מגנטי סביב מוליך ישר נושא זרם.

י"ד2) השדה המגנטי, הנרצר על-ידי אלקטרומגנט, מורכב:

א) מסכום קווי הכוח, הנוצרים על-ידי הסליל ועל-ידי הליבה.
ב) מהפרש קווי הכוח, הנוצרים על-ידי הסליל ועל-ידי הליבה.
ג) מקווי כוח, הנוצרים על-ידי הסליל בלבד.
ד) מקווי כוח, הנוצרים על-ידי הליבה בלבד.

י"ד3) בשם שטף מגנטי אנו מכנים את:

א) עוצמת השדה המגנטי.
ב) הכוח-המגנטו-מניע.
ג) את מספר קווי הכוח המגנטיים ביחידת שטח.
ד) את כלל קווי הכוח במעגל מגנטי.

י"ד4) יחידת השטף המגנטי היא:

א) ובר.
ב) ובר למ"ר.
ג) אמפר-כריכות.
ד) אמפר-כריכות למטר.

י"ד5) השראה מגנטית היא:

א) עוצמת שדה מגנטי.
ב) שטף מגנטי.
ג) צפיפות השטף המגנטי.
ד) כוח-מגנטו-מניע.

י"ד6) וובר למטר מרובע היא יחידה של:

א) כוח-מגנטו-מניע.
ב) השראה מגנטית.
ג) עוצמת השדה.
ד) שטף מגנטי.

י"ד7) ככל שנגדיל את שטח החתך של מעגל מגנטי:

א) תהיה ההשראה נמוכה יותר.
ב) תהיה ההשראה גבוהה יותר.
ג) תהיה עוצמת השדה נמוכה יותר.
ד) תהיה עוצמת השדה גבוהה יותר.

י"ד8) חלחלות היא היחס הקיים בין:

א) השטף המגנטי לבין עוצמת השדה המגנטי.
ב) הכוח-המגנטו-מניע לבין השטף המגנטי.
ג) עוצמת השדה המגנטי לבין ההשראה המגנטית.
ד) ההשראה המגנטית לבין עוצמת השדה המגנטי.

י"ד9) יחידת החלחלות המגנטית היא:

א) אמפר-כריכות לווובר למטר.
ב) מטר לאמפר-כריכות לווובר.
ג) אמפר-כריכות מטר לווובר
ד) ווובר לאמפר-כריכות למטר.

י"ד10) חלחלות יחסית מציינת:

א) פי כמה גבוהה החלחלות של חומר מסויים מהחלחלות של הריק.
ב) פי כמה גבוהה החלחלות של הריק מהחלחלות של חומר מסויים.
ג) פי כמה גבוהה החלחלות של חומר מסויים מהחלחלות של ברזל.
ד) פי כמה גבוהה החלחלות של פלדה קשה מהחלחלות של פלדה רכה.

י"ד11) את החלחלות המחלטת של חומר מחשבים באמצעות הנוסחא:

א) $\mu_r = \mu\mu_o$

ב) $\mu_o = \mu\mu_r$

ג) $\mu = \frac{\mu_o}{\mu_r}$

ד) $\mu = \mu_o\mu_r$

י"ד12) החלחלות של אוויר:

א) גבוהה מהחלחלות של הריק.

ב) נמוכה מהחלחלות של הריק.

ג) שווה לחלחלות של הריק.

ד) עשויה להיות גבוהה או נמוכה מזו של הריק.

י"ד13) אם מעלים את עוצמת השדה המגנטי בליבה של אלקטרומגנט, החלחלות:

א) גדלה.

ב) קטנה.

ג) נשארת קבועה.

ד) עולה עד לערך מסויים ולאחר מכן יורדת.

י"ד14) אפיין המיגנוט מתאר את הקשר בין:

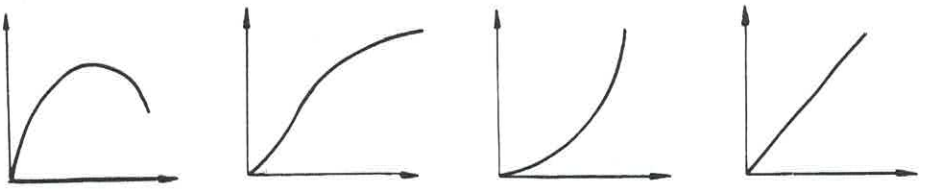
א) ההשראה המגנטית לעוצמת השדה בחומר פררומגנטי.

ב) הכוח המגנטו מניע לעוצמת הזרם החשמלי בסליל.

ג) ההשראה המגנטית לשטף בחומרים פררומגנטיים.

ד) החלחלות של חומר פררומגנטי לחלחלות של האוויר.

י"ד15) איזה מהאפיינים הבאים מתאר עקום מיגנוט:



א) ב) ג) ד)

י"ד16) איזהו המשפט הנכון?

א) תופעת הרוויה המגנטית אופינית לכל חומר וחומר.

ב) תופעת הרוויה המגנטית אופיינית לחומרים פררומגנטיים בלבד.

ג) תופעת הרוויה המגנטית אופיינית לפלדות קשות בלבד.

ד) תופעת הרוויה המגנטית אופיינית לפלדות רכות בלבד.

י"ד17) מגנטיות נותרת היא:

א) ההשראה המגנטית המירבית בתהליך מיגנוט.

ב) ההשראה המגנטית הנמוכה ביותר בתהליך מיגנוט.

ג) ההשראה המגנטית הנשארת לאחר הורדת עוצמת השדה עד לאפס.

ד) ההשראה המגנטית הנשארת לאחר הפיכת כיוון הזרימה של הזרם בסליל.

י"ד18) כפיינות היא:

א) עוצמת השדה, היוצרת את המותירות.

ב) עוצמת השדה, היוצרת את ההשראה המירבית.

ג) תכונת החומר לשמור על סגולותיו המגנטיות.

ד) עוצמת השדה, הדרושה לביטול המגנטיות הנותרת.

י"ד19) לייצור מגנטים קבועים משתמשים בחומרים פררומגנטיים בעלי:

א) מותירות גבוהה וכפיינות גבוהה.

ב) מותירות נמוכה וכפיינות נמוכה.

ג) מותירות גבוהה וכפיינות נמוכה.

ד) מותירות נמוכה וכפיינות גבוהה.

י"ד20) לייצור מגנטים ארעיים משתמשים בחומרים פררומגנטיים בעלי:

א) מותירות גבוהה וכפיינות גבוהה.

ב) מותירות נמוכה וכפיינות נמוכה.

ג) מותירות גבוהה וכפיינות נמוכה.

ד) מותירות נמוכה וכפיינות גבוהה.

י"ד21) לייצור מגנטים קבועים משתמשים בחומרים פררומגנטיים בעלי לולאת מיגנוט:

א) צרה ככל האפשר.
ב) רחבה ככל האפשר.
ג) אין חשיבות לרוחב.
ד) אין חשיבות לצורת הלולאה.

י"ד22) לייצור מגנטים ארעיים משתמשים בחומרים פררומגנטיים בעלי לולאת מיגנוט:

א) צרה ככל האפשר.
ב) רחבה ככל האפשר.
ג) אין חשיבות לרוחב.
ד) אין חשיבות לצורת הלולאה.

י"ד23) הפסדי החשל מופיעים:

א) בזרם ישר.
ב) בזרם חילופין.
ג) בזרם חזק.
ד) בזרם חלש.

י"ד24) לצימצום הפסדי החשל במכונות חשמל נוהגים להשתמש בחומרים:

א) בעלי לולאת חשל צרה.
ב) בעלי לולאת חשל רחבה.
ג) בעלי מותירות גבוהה.
ד) בעלי כפיינות גבוהה.

י"ד25) בשם "מיאון" אנו מכנים:

א) את המוליכות המגנטית של החומר.
ב) את צפיפות השטף במעגל מגנטי.
ג) את מסלול קווי הכוח במעגל מגנטי.
ד) את ההתנגדות המגנטית של החומר.

י"ד26) חוק אום למעגלים מגנטיים קובע:

א) עוצמת השדה המגנטי נמצאת ביחס ישר לכוח-המגנטו-מניע וביחס הפוך למיאון.
ב) ההשראה המגנטית נמצאת ביחס ישר לעוצמת השדה וביחס ישר לחלחלות.
ג) עוצמת השדה המגנטי נמצאת ביחס ישר לכוח-המגנטו-מניע וביחס הפוך לאורך המעגל.
ד) השטף המגנטי נמצא ביחס ישר לכוח-המגנטו-מניע וביחס הפוך למיאון.

י"ד27) המיאון של מעגל מגנטי נמצא:

א) ביחס ישר לאורכו, ביחס ישר לשטח חתכו, וביחס ישר לחלחלות.
ב) ביחס ישר לאורכו, ביחס ישר לחלחלות, וביחס הפוך לשטח החתך.
ג) ביחס ישר לאורכו, ביחס הפוך לשטח החתך, וביחס הפוך לחלחלות.
ד) ביחס ישר לחלחלות, ביחס הפוך לאורכו, וביחס הפוך לשטח החתך.

י"ד28) ככל שיגדל אורכו של מעגל מגנטי:

א) המיאון יגדל.
ב) המיאון יקטן.
ג) המיאון לא ישתנה.
ד) המיאון ישתנה בחומר פררומגנטי בלבד.

י"ד29) יחידת המיאון היא:

א) אמפר-כריכות לוובר.
ב) אמפר-כריכות למטר.
ג) ווב לאמפר-כריכות.
ד) ווב למ"ר.

ב ע י ו ת

י"ד1) דרך ליבה של אלקטרומגנט, בעלת שטח חתך של 5 סמ"ר, עובר שטף בשיעור 2×10^{-4} ווב. חשב את ההשראה בליבה.

י"ד2) ההשראה בליבה של אלקטרומגנט היא 1.2 ווב-למ"ר. חשב את השטף בליבה, אם החתך שלה הוא מלבן בעל צלעות 2×6 ס"מ.

י"ד3) מה צריך להיות השטף בליבה בעלת חתך עגול, שקוטרו 10 ס"מ, אם מעוניינים שההשראה בליבה תהיה 1 ווב-למ"ר?

י"ד4) מעוניינים ליצור שטף של 4×10^{-4} ווב בליבה בעלת שטח חתך של 8 סמ"ר. מה צריך להיות שיעור ההשראה בליבה?

י"ד5) החלחלות של חומר פררומגנטי מסוים גבוהה פי 500 מחלחלות האוויר.
חשב את החלחלות המחלטת של החומר.

י"ד6) החלחלות המחלטת של פלדה קשה היא 1256×10^{-6} ווبר לאמפר-כריכות למטר.
חשב את החלחלות היחסית של חומר זה.

י"ד7) עוצמת השדה בסליל בעל ליבת אוויר היא 500 אמפר-כריכות למטר.
חשב את ההשראה בלב הסליל.

י"ד8) חשב את עוצמת השדה בסליל, בעל ליבת אוויר, אם צפיפות השטף בליבה היא 6.28×10^{-4} ווبר למ"ר.

י"ד9) עוצמת השדה המגנטי בליבות של שני אלקטרומגנטים, היא 4000 אמפר-כריכות למטר. בליבה של האלקטרומגנט הראשון מצויה השראה בשיעור 0.7 ווبר-למ"ר, ובליבה של השני 1.58 ווبר-למ"ר.
חשב את החלחלות היחסית של כל אחת מהליבות.

י"ד10) דרך סליל בעל 500 כריכות זורם זרם בעוצמה של 0.45 אמפר.
חשב את הכוח-המגנטו-מניע המתפתח על-ידי הסליל.

י"ד11) חשב את עוצמת השדה בסליל שאורכו 35 ס"מ, אם הוא כרוך 490 כריכות ונושא זרם שעוצמתו 1.5A .

י"ד12) סליל, שאורכו 23 ס"מ, כרוך 250 כריכות ונושא זרם, שעוצמתו 4 אמפר.
חשב את הכוח-המגנטו-מניע ואת עוצמת השדה בלב הסליל.

י"ד13) מהי עוצמת הזרם, שיש להזרים דרך סליל בעל ליבת אוויר, הכרוך 1000 כריכות, על-מנת שההשראה בלב הסליל תהיה 1.8×10^{-5} ווبر למ"ר. **אורך הסליל 1 מטר.**

י"ד14) סליל כרוך על גליל פרספן שקוטרו 4 ס"מ. מספר הכריכות הוא 10 לכל ס"מ של אורך הסליל. חשב את השטף בלב הסליל, אם הוא נושא זרם בשיעור 1A .

י"ד15) סליל בעל ליבת אוויר, שחתכה 5 סמ"ר, כרוך 10 כריכות לכל ס"מ של אורכו.
עוצמת הזרם הזורם בסליל היא 2 אמפר. חשב:

א) את עוצמת השדה המגנטי בסליל.

ב) את צפיפות השטף המגנטי.

ג) את שיעור השטף המגנטי.

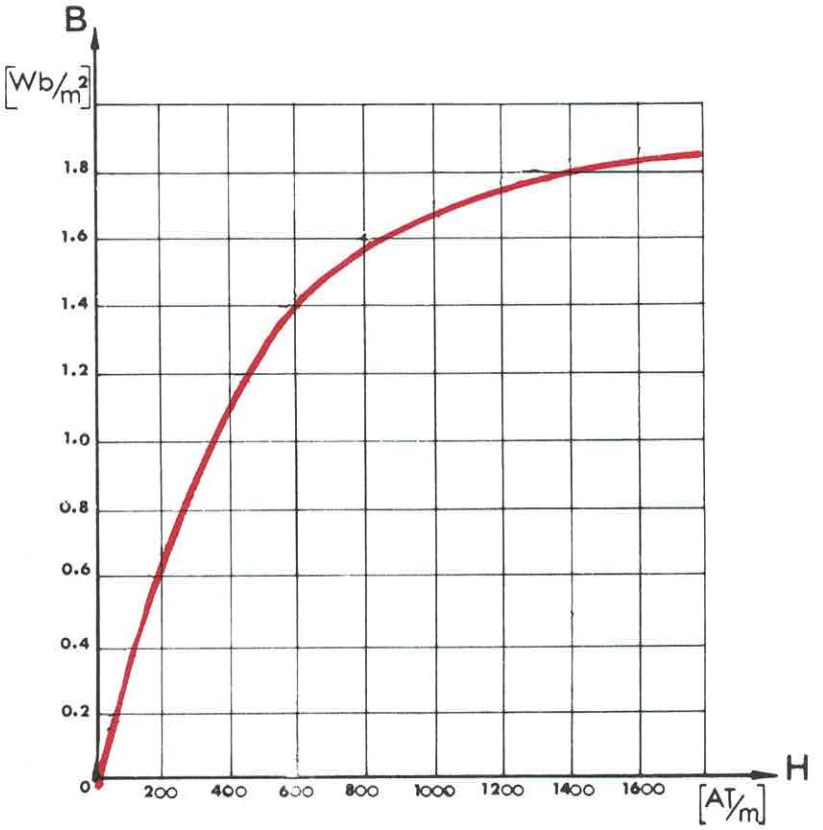
י"ד16) היעזר בטבלה הבאה כדי לחשב את החלחלות היחסית של פלדת סיליקון, יצקת פלדה ויצקת ברזל.

	יצקת ברזל	יצקת פלדה	פלדת סיליקון
B [Wb/m^2]	0.7	1.16	1.24
H [AT/m]	3200	810	600

י"ד17) לכמה אמפר-כריכות זקוקים כדי ליצור השראה בשיעור 1.24 וובר למ"ר בליבת פלדה, שאורכה 38 ס"מ, אם החלחלות היחסית של הליבה, בתנאים אלה היא 1600?

י"ד18) נתון סליל שאורכו 20 ס"מ. הסליל כרוך 1000 כריכות ונרשא זרם שעוצמתו 0.1 אמפר. מכניסים לתוך הסליל ליבת ברזל בעלת שטח חתך של 10 סמ"ר.
חשב את עוצמת השדה, את ההשראה ואת השטף בתוך הליבה, אם החלחלות היחסית של הברזל היא 500 .

י"ד19) על ליבת ברזל, בעלת שטח חתך של 16 סמ"ר ואורך 20 ס"מ, כרוך סליל בעל 400 כריכות. עוצמת הזרם בסליל היא 0.5 אמפר.
חשב את השטף המגנטי בליבה.
היעזר באפיין המיגנוט, של החומר ממנו עשויה הליבה (ציור י"ד18).



ציור י"ד18

י"ד20) מוט ברזל, שאורכו 1 מ' וקוטרו 2 ס"מ, נמצא בתוך סליל שאורכו 1 מ' וכרוך 1000 כריכות. הסליל נושא זרם שעוצמתו 0.5 אמפר.

א) חשב את השטף המגנטי בגרעין, תוך הנחה, שהחלחלות היחסית היא 750 .

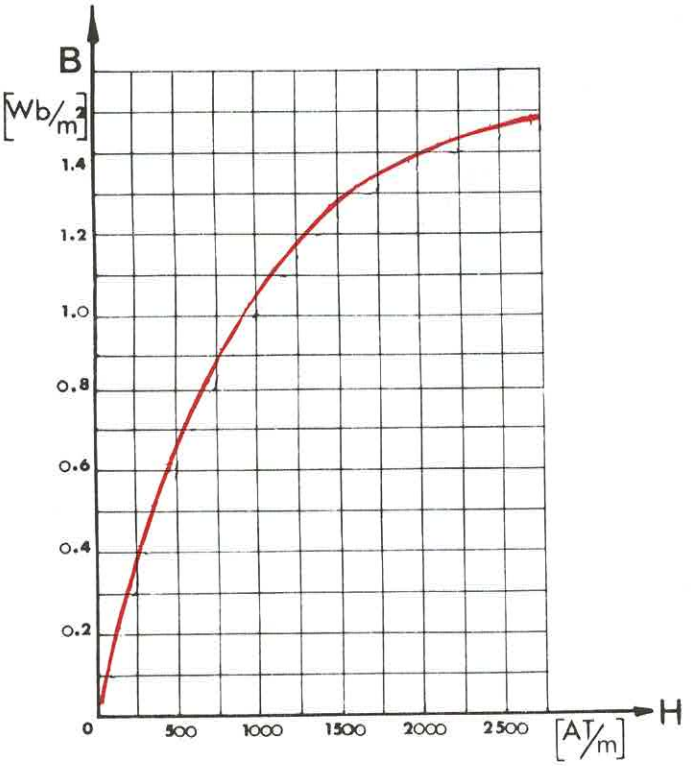
ב) מה יהיה השטף בלב הסליל, אם נוציא מתוכו את הליבה?

י"ד21) על שלד פרספן, בעל חתך ריבועי 5×5 ס"מ, כרוך סליל בעל 150 כריכות, הנושא זרם שעוצמתו 2 אמפר.

אורך שלד הפרספן הוא 20 ס"מ.

א) חשב את עוצמת השדה המגנטי, את ההשראה ואת השטף בלב הסליל.

ב) מכניסים לתוך הסליל ליבת יצקת-פלדה, אשר אפיין המיגנוט שלה נתון בציור י"ד19: מצא את ההשראה בליבה ואת החלחלות היחסית.



ציור י"ד19

י"ד22) חשב את המיאון של מוט עשוי עץ, שאורכו 50 ס'מ ושטח החתך שלו 5 סמ"ר.

י"ד23) חשב את המיאון של מוט ברזל, שאורכו 12.56 ס"מ ושטח החתך שלו 5 סמ"ר. הנח, שהחלחלות היחסית של הברזל היא 200 .

י"ד24) סליל בעל שכבה אחת כרוך מקצה לקצה של מוט, עשוי חומר פלסטי, שאורכו 1 מטר ושטח החתך שלו 5 סמ"ר. התייל הוא מבודד וקוטרו הכולל הוא 1 מ"מ. הסליל נושא זרם בעוצמה של 2 אמפר.

חשב:

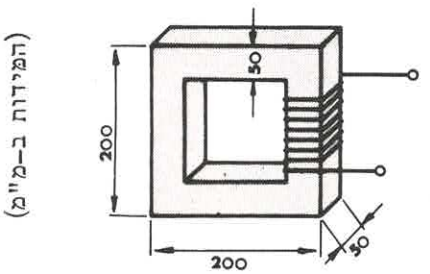
א) את הכוח-המגנטו-מניע.

ב) את המיאון של הליבה.

ג) את השטף המגנטי.

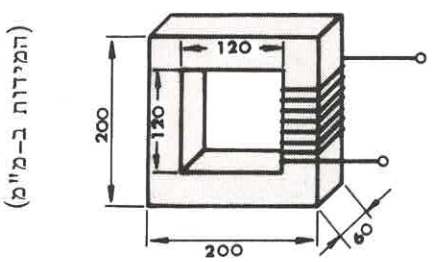
ד) את ההשראה המגנטית.

י"ד25) מעוניינים ליצור שטף בשיעור 3×10^{-3} ווبר במעגל המגנטי, המופיע בציור י"ד20.
החומר הוא יצקת פלדה.
חשב את מספר הכריכות של הסליל, אם עוצמת הזרם דרכו היא 5 אמפר.
היעזר באפיין המיגנוט, המופיע בציור י"ד19.



ציור י"ד20

י"ד26) מעוניינים ליצור השראה בשיעור 1.2 ווبר-למ"ר במעגל המגנטי, המופיע בציור י"ד21.
המעגל עשוי יצקת פלדה ומידותיו כמתואר בציור.
חשב: את עוצמת זרם המיגנוט בסליל ואת השטף במעגל, אם הסליל כרוך 560 כריכות.
היעזר באפיין המיגנוט, המופיע בציור י"ד19.



ציור י"ד21

י"ד27) על מעגל מגנטי בעל אורך ממוצע של 100 ס"מ ושטח חתך של 5 סמ"ר כרוך סליל בעל 500 כריכות.
איזו עוצמת זרם עלינו להזרים בסליל העירור, על מנת שנקבל שטף בשיעור 6.5×10^{-4} ווبר בליבה?
היעזר בטבלה הבאה, המתאימה לחומר ממנו מורכב המעגל.

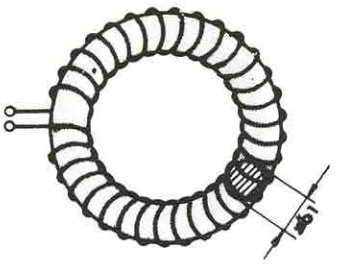
B [Wb/m^2]	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
μ_r	2000	1700	1500	1300	1100

י"ד28) יוצרים מעגל מגנטי סגור, באמצעות מוט ברזל בעל שטח חתך של 10 סמ"ר, שהיקפו הממוצע 100 ס"מ.

כורכים סליל בעל 500 כריכות, על המוט, ומזרימים דרכו זרם עירור בעוצמה של 3A . מהי החלחלות היחסית של הברזל אם מתעורר בו שטף של 2×10^{-3} ווبר?

י"ד29) סליל כרוך על טבעת עץ בעלת חתך עגול (ציור י"ד22). הקוטר הממוצע של הטבעת הוא 10 ס"מ וקוטר החתך 1 ס"מ.

חשב את השטף בטבעת, אם מספר כריכות הסליל הוא 500 והוא נושא זרם שעוצמתו 2A .



ציור י"ד22

י"ד30) סליל בן 200 כריכות, הנושא זרם בשיעור 5 אמפר, כרוך על ליבת עץ טבעתית, שקוטרה הממוצע הוא 40 ס"מ ושטח החתך שלה 5 סמ"ר. חשב את השטף בטבעת.

י"ד31) על טבעת עשויה חומר פלסטי, בעלת היקף ממוצע של 32 ס"מ ושטח חתך של 2 סמ"ר, כרוך סליל בעל 800 כריכות, הנושא זרם בעוצמה של 4 אמפר. חשב:

א) את הכוח-המגנטו-מניע.

ב) את עוצמת השדה המגנטי בתוך הטבעת.

ג) את ההשראה בטבעת.

ד) את השטף בטבעת.

ה) את המיאון של המעגל.

י"ד32) על טבעת ברזל בעלת קוטר ממוצע של 15 ס"מ כרוך סליל עירור בן 100 כריכות. חשב את עוצמת זרם העירור בסליל, הדרוש כדי לפתח השראה בשיעור 1 ווبר-למ"ר. אפיין המיגנוט המתאים לחומר זה מראה, כי הערך של עוצמת השדה המתאים להשראה בשיעור 1 ווبר-למ"ר הוא 320 אמפר-כריכות למטר.

י"ד33) מהו מספר האמפר-כריכות, הדרוש כדי לפתח שטף של 5×10^{-3} ווברר, בטבעת פלדה, בעלת קוטר ממוצע של 0.5 מטר ושטח חתך של 40 סמ"ר, אם החלחלות היחסית של הפלדה היא 1950?

י"ד34) על טבעת פלדה, בעלת קוטר ממוצע של 25 ס"מ ושטח חתך של 12 סמ"ר, כרוך סליל עירור בן 150 כריכות, הנושא זרם עירור שעוצמתו 5A .
חשב את השטף המתעורר בטבעת.
היעזר באפיין המיגנוט, המופיע בציור י"ד18.

י"ד35) על טבעת, עשויה יצקת פלדה, בעלת קוטר ממוצע של 10 ס"מ ושטח חתך של 4 סמ"ר, כרוך סליל בן 1000 כריכות. מהי עוצמת זרם המיגנוט, שיש להזרים בסליל כדי לעורר בטבעת שטף של 4.8×10^{-4} ווברר?
היעזר באפיין המיגנוט שבציור י"ד19.

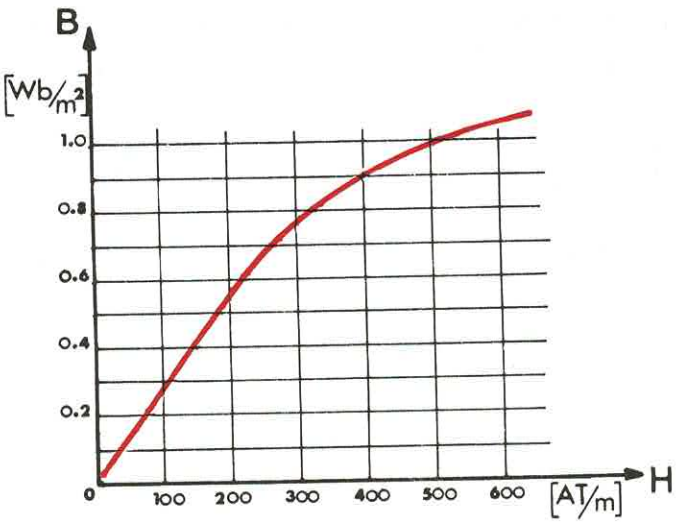
י"ד36) במעגל מגנטי, עשוי ברזל, מצוי חריץ אוויר שרוחבו 3 מ"מ.
אורך המסלול המגנטי בברזל הוא 50 ס"מ והחלחלות היחסית של הברזל היא 900
מהו מספר האמפר-כריכות הדרוש, על מנת שצפיפות השטף במעגל תהיה 1 ווברר-למ"ר?

י"ד37) בטבעת ברזל, בעלת קוטר ממוצע 25 ס"מ ושטח חתך 3 סמ"ר, מצוי חריץ אוויר שרוחבו 0.4 מ"מ.
על טבעת זו כרוך סליל בן 500 כריכות והחלחלות היחסית של הברזל היא 2470 .
חשב את עוצמת זרם המיגנוט הדרושה כדי לעורר שטף מגנטי של 2.1×10^{-4} ווברר בטבעת.

י"ד38) לטבעת ברזל קוטר ממוצע של 25 ס"מ ושטח חתך של 5 סמ"ר.
בטבעת מצוי חריץ אוויר ברוחב 1 מ"מ, ועליה כרוך סליל בן 4000 אמפר-כריכות.
חשב את החלחלות היחסית של הברזל, אם צפיפות השטף בחריץ האוויר היא 1.1 ווברר למ"ר.

י"ד39) לטבעת ברזל שטח חתך של 3 סמ"ר וקוטר ממוצע של 12 ס"מ.
בטבעת חריץ אוויר ברוחב 2 מ"מ, ועליה כרוך סליל.
חשב את מספר האמפר-כריכות הדרוש על-מנת לעורר בברזל שטף מגנטי בשיעור 3.3×10^{-5} ווبר, אם בשביל המסלול אשר בברזל דרושה עוצמת שדה בשיעור 2.89 אמפר-כריכות למטר.

י"ד40) אורכו של מסלול מגנטי הוא 1.2 מטר ושטח החתך שלו 200 סמ"ר.
חשב את מספר הכריכות של הסליל, הכרוך על המוט, אם זרם בעוצמה של 3 אמפר, הזורם דרכו, מעורר שטף של 0.02 ווبר.
היעזר באפיין המיגנוט, המופיע בציור י"ד23.



ציור י"ד23

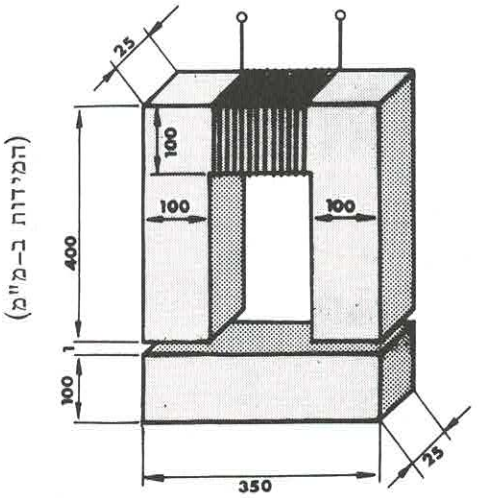
י"ד41. על טבעת פלדה, בעלת קוטר ממוצע של 20 ס"מ ושטח חתך של 3 סמ"ר, כרוך סליל בעל 500 כריכות. בטבעת מירוח אוויר ברוחב 0.1 מ"מ.
חשב את עוצמת זרם המיגנוט הדרוש כדי ליצור שטף מגנטי של 4.05×10^{-4} ווبר בחריץ האוויר, אם עוצמת השדה בפלדה היא 1000 אמפר-כריכות למטר.
חשב גם את החלחלות היחסית של הפלדה.

י"ד42) סליל בעל 200 כריכות כרוך על טבעת פלדה בעלת שטח חתך של 6 סמ"ר, וקוטר ממוצע של 22 ס"מ.

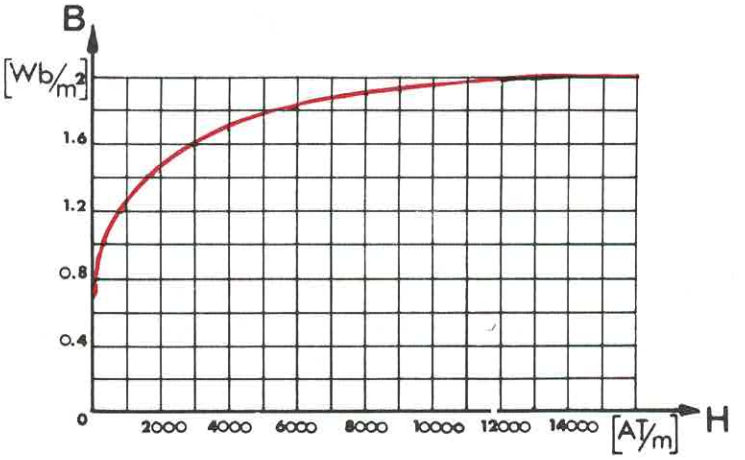
א) חשב את עוצמת זרם המיגנוט ואת המיאון, של המעגל המגנטי, אם השטף במעגל הוא 6×10^{-4} ווبר ועוצמת השדה היא 750 אמפר-כריכות למטר.

ב) מה צריכה להיות העוצמה של זרם המיגנוט, על מנת שהשטף לא ישתנה, אם חותכים, במעגל המגנטי, חריץ אוויר שרוחבו 0.5 מ"מ?
מה יהיה המיאון של המעגל במקרה זה?

י"ד43) בציור י"ד24 מופיע מעגל טורי בעל שני חריצי אוויר.
חשב את מספר האמפר-כריכות הדרוש כדי לעורר במעגל שטף של 0.003 ווبר.
בציור י"ד25 מופיע אפיין המיגנוט של החומר, ממנו בנוי המעגל.



ציור י"ד24



ציור י"ד25